

过电压及保护

武汉水利电力学院《过电压及保护》编写组

*

水利电力出版社出版

(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

水利电力出版社印刷厂印刷

*

1977年8月北京第一版

1977年8月北京第一次印刷

印数 00001—42380 册 每册 1.10 元

书号 15143·3265

前 言

各地搞过电压保护工作的同志纷纷反映，需要有一本普及性的实用的参考书。我们虽然水平有限，但在编写本书时，力求反映我国工人阶级在毛主席革命路线指引下，二十多年来在过电压保护工作方面的成就，并吸收各国有益的经验。在叙述上使广大工农兵同志易于掌握，以便在普及的基础上提高现场过电压保护工作的水平。

本书尽可能反映有我国过电压保护工作的特色：所用数据多为我国运行经验和科学实验的结果；所用保护方法不少是我国的独创。

为使从事过电压保护工作的广大工农兵同志易于掌握本书，并用来解决现场的实际问题，在编写时，我们注意到：

1. 讨论问题从现场实际出发，而不是从定义出发，着重介绍现场的运行经验。

2. 着重阐明各种过电压现象的物理过程，及其解决办法的物理概念，例如对电感-电容回路中振荡过电压的产生，先阐明物理概念，然后再辅以数学推导，等等。

3. 强调基本的技术结论以及实际应用时的注意事项。

4. 用最易懂的数学阐明复杂的现象。例如，流动波规律是用简单的代数方法证明的；一相接地后健全相电压的升高是用叠加法求出的，等等。全书没有采用运算微积的方法。有些较复杂的数学证明，则放在附录中。

5. 叙述时从简单的问题逐步引导到较复杂的问题，并将

难点加以分散。

6.为加深理解，每节后面都给出了习题，其中带有星号的习题，则是专为专业基础较好的同志预备的。为了便于自学，在本书末附有全部习题的答案。

7.过电压保护工作中一些常用的数据，列在附录中，以便查阅。

本书为从事电气工作有一定经验的工人和技术人员阅读的过电压及保护的理论书籍，并可考虑作为高等院校和“七·二一”工人大学有关专业的教学参考书。限于我们的政治和业务水平，书中错误和缺点在所难免，欢迎读者提出宝贵意见，以便再版时改正。

武汉水利电力学院《过电压及保护》编写组

一九七六年十一月

目 录

前 言

绪 论	1
-----	---

第一章 内过电压	4
----------	---

概述	4
----	---

第一节 切空载变压器过电压	4
---------------	---

第二节 切、合空载线路过电压	9
----------------	---

第三节 电弧接地过电压	24
-------------	----

第四节 谐振过电压的一般性质	28
----------------	----

第五节 断线谐振过电压	34
-------------	----

第六节 电压互感器饱和过电压	40
----------------	----

第七节 非全相拉合闸过电压	51
---------------	----

第八节 电容传递过电压	56
-------------	----

第九节 凸极机不对称短路过电压	60
-----------------	----

第十节 参数谐振过电压	65
-------------	----

第十一节 工频电压升高	72
-------------	----

第十二节 超高压电网中内过电压的特点	81
--------------------	----

第十三节 各级电压电网的内过电压	86
------------------	----

第一章简要结论	95
---------	----

第二章 雷电特性和防雷措施	99
---------------	----

概述	99
----	----

第一节 雷电放电和雷电测量	103
---------------	-----

第二节 雷暴日和雷电流	111
-------------	-----

第三节	避雷针(线)的保护范围	118
第四节	保护间隙和管型避雷器	126
第五节	普通阀型避雷器的原理	137
第六节	普通阀型避雷器的电气特性	147
第七节	避雷器灭弧电压和额定冲击电流的选择	154
第八节	磁吹阀型避雷器	162
第九节	阀型避雷器的总体结构和放电记录器	169
第十节	阀型避雷器的试验	181
第二章	简要结论	191

第三章 送电线路的防雷194

概述	194
第一节	雷电流沿线路的流动198
第二节	雷击导线与耦合系数205
第三节	线路感应雷209
第四节	雷直击于无避雷线线路212
第五节	雷直击于有避雷线线路219
第六节	线路防雷接地装置234
第七节	各级电压线路防雷措施245
第三章	简要结论256

第四章 变电所防雷260

概述	260
第一节	发电厂和变电所的直击雷保护262
第二节	变压器绕组内波过程268
第三节	变压器与避雷器间的距离280
第四节	变电所的进线段保护292
第五节	变压器中性点保护309
第六节	三绕组变压器、自耦变压器以及变电所 3~10 千伏侧和控制回路的保护316

第七节	电缆护层绝缘的过电压及保护	324
第八节	发电厂和变电所的接地和测量	355
第九节	配电网的保护	372
第四章	简要结论	376

第五章 旋转电机防雷383

概述	383
第一节 直配电机的防雷保护元件	388
第二节 直配电机防雷保护接线方式	399
第三节 经变压器送电的电机防雷保护	410
第五章 简要结论	422

第六章 中性点接地方式与绝缘配合424

概述	424
第一节 中性点接地方式	425
第二节 线路和变电所架空导线绝缘的选择	437
第三节 电气设备的试验电压	445
第六章 简要结论	454

附录 I 用对称分量法计算单相接地故障457

附录 II 分布参数回路的过渡过程 和工频稳态末端电压升高463

附录 III 线路防雷设计常用数据476

附录 IV 地网接地电阻的计算480

附录 V 电机防雷常用数据494

附录 VI 电网对地电容及电容电流的测量496

附录 VII 对电气设备绝缘试验电压标准的讨论499

附录 VIII 习题答案505

全国年平均雷暴日数分布图

绪 论

伟大的无产阶级文化大革命极大地焕发了广大群众的革命精神，在毛主席无产阶级革命路线的指引下，我国的工人阶级以顶天立地的英雄气概，坚持“**独立自主，自力更生**”的建国方针，有力地推动了我国的社会主义建设事业。电力工业也和其它战线一样，形势大好，形势喜人。中、小型电站迅速增长，大型电站不断建成，高压送电线路大量架设，系统容量日益扩大。因此，就要求电力系统进一步提高安全、经济和高质量的发、供电。所以，电力系统的安全和经济运行，对祖国的社会主义革命和建设事业来说是很重要的一环。但是，由于各种原因，系统中某部分的电压可能升高，而且往往大大超过设备的最高工频运行电压值，这就是过电压。由此带来的可能后果是：设备绝缘损坏，造成长时间的停电及人身安全事故，给国民经济和人民的生命安全带来损失。为此，认真地开展过电压保护工作，合理地确定系统的绝缘水平，广泛地进行过电压工作的探讨和研究，组织起一支“三结合”的又红又专的高压工作者队伍，对于多快好省地进行电力工业的生产和建设，促进我国社会主义建设事业的发展，都具有重大的意义。

据统计，电力系统中的绝缘事故占总事故次数的一半以上，其中由于过电压使绝缘破坏的情况更为突出。过电压包括内过电压和外过电压。内过电压是由系统内的能量的转化或传递引起的，包括操作过电压、电弧接地过电压和谐振过

电压等。外过电压则是由雷击引起的，所以又叫雷电过电压或大气过电压。

解放前，在三座大山的压迫下，我国电力工业处于极端落后的状态，过电压保护工作更是无人过问。不但防雷保护设备残缺不全，电气设备的绝缘水平也存在不少问题，更谈不到进行内过电压和外过电压的研究了。因此，事故频繁，供电极不安全可靠。解放后，在毛主席和党中央的领导下，电力工业发展很快，过电压保护工作也取得了很大成绩，过电压事故率成倍地下降。无产阶级文化大革命以来，由于批判了刘少奇、林彪和王、张、江、姚“四人帮”的反革命修正主义路线，各地的过电压保护工作“三结合”班子更加巩固和充实，广大生产、科研和教学单位遵照毛主席“**打破洋框框，走自己工业发展道路**”的教导，认真总结了建国二十多年来的经验，从220伏低压配电系统到330千伏超高压系统的一套适合我国国情的过电压保护办法正在建立和完善。目前我国电力系统的雷害跳闸率已进入世界上雷害跳闸率较小的先进国家行列。现在我们已经有了自己的雷电流参数、内过电压统计曲线、避雷针和线路防雷设计方法和发变电所接地设计方法，并已能生产新型的氧化锌避雷器、330千伏磁吹避雷器以及能降低内过电压的断路器等，部分500~750千伏高压设备也已试制成功。

过电压保护工作和其它工作一样，必须认真贯彻党的路线、方针和政策。在开展过电压保护工作时，要实行工人、干部和技术人员的三结合，设计、施工和运行单位的三结合，生产、科研和教学的三结合。根据各地的实际情况，结合运行经验，做到技术先进、安全、经济。不断总结经验，做到“**有所发现，有所发明，有所创造，有所前进**”。进一

步做好电力系统的过电压保护工作，更好地为我国的社会主义革命和建设事业服务。

我们相信，在毛主席革命路线指引下，在以华国锋主席为首的党中央的正确领导下，随着我国高压电网的发展，我们的过电压保护工作必将迅速赶上和超过世界先进水平，对人类有较大的贡献。

第一章 内 过 电 压

概 述

由于电网中能量的转化或传递所产生的电网电压升高，叫做电网的内过电压。这里所说的能量转化是指磁能转化为电能，所说的能量传递则主要是通过各部分相互之间的电容。电网内的操作（拉闸或合闸）和故障都是激发能量转化的原因。由于操作而引起的内过电压也叫操作过电压。

常见的内过电压有：

- 1.切空载变压器（以下简称空变）的过电压；
- 2.切、合空载线路（以下简称空线）的过电压；
- 3.电弧接地过电压；
- 4.谐振过电压；

内过电压的能量来源于电网本身，所以它的幅值是和电网的工频电压基本上成正比的。内过电压的幅值与电网该处工频相电压的幅值 U_{xg} 之比，叫内过电压倍数 K 。 K 值与电网结构、系统容量和参数、中性点接地方式、断路器性能、母线上的出线数目以及电网运行接线、操作方式等因素有关，它具有统计规律。如无特殊指明，本书中内过电压均指相线对大地的过电压倍数，或简称过电压。

第一节 切空载变压器过电压

电网中用断路器切开空载变压器（以下简称空变）是一

种常规操作方式。在这种操作过程中，有可能产生很高的过电压。过去，我国电网中个别厂站，由于断路器和变压器配合不当，并且在变压器上没有避雷器的直接保护，曾发生过一些事故：例如陕西某发电厂和南京某发电厂用 110 千伏少油断路器 VEL-110 切空变曾引起套管相间 1100 毫米和 900 毫米间隙放电，南京某发电厂并引起断路器瓷瓶爆炸。现在，切空变过电压已经可以妥善解决。

运行经验证明，所用断路器的灭弧能力越强，则切空变的过电压事故就越多。可见，这种过电压和断路器在切断变压器的激磁电流时灭弧能力太强有关。断路器应当能切断变压器的短路电流，而激磁电流不过为短路电流的几百分之一到几万分之一。所以，在切断激磁电流 i_L 时，有可能不是在电流经过工频自然零点时熄弧，而是在电流瞬时值尚为 i_0 时，因断路器灭弧能力太强被迫很快下降到零，即

$$\frac{di_L}{dt} \rightarrow -\infty,$$

于是在变压器激磁电感 L 上将感应出过电压

$$u = L \frac{di_L}{dt} \rightarrow -\infty,$$

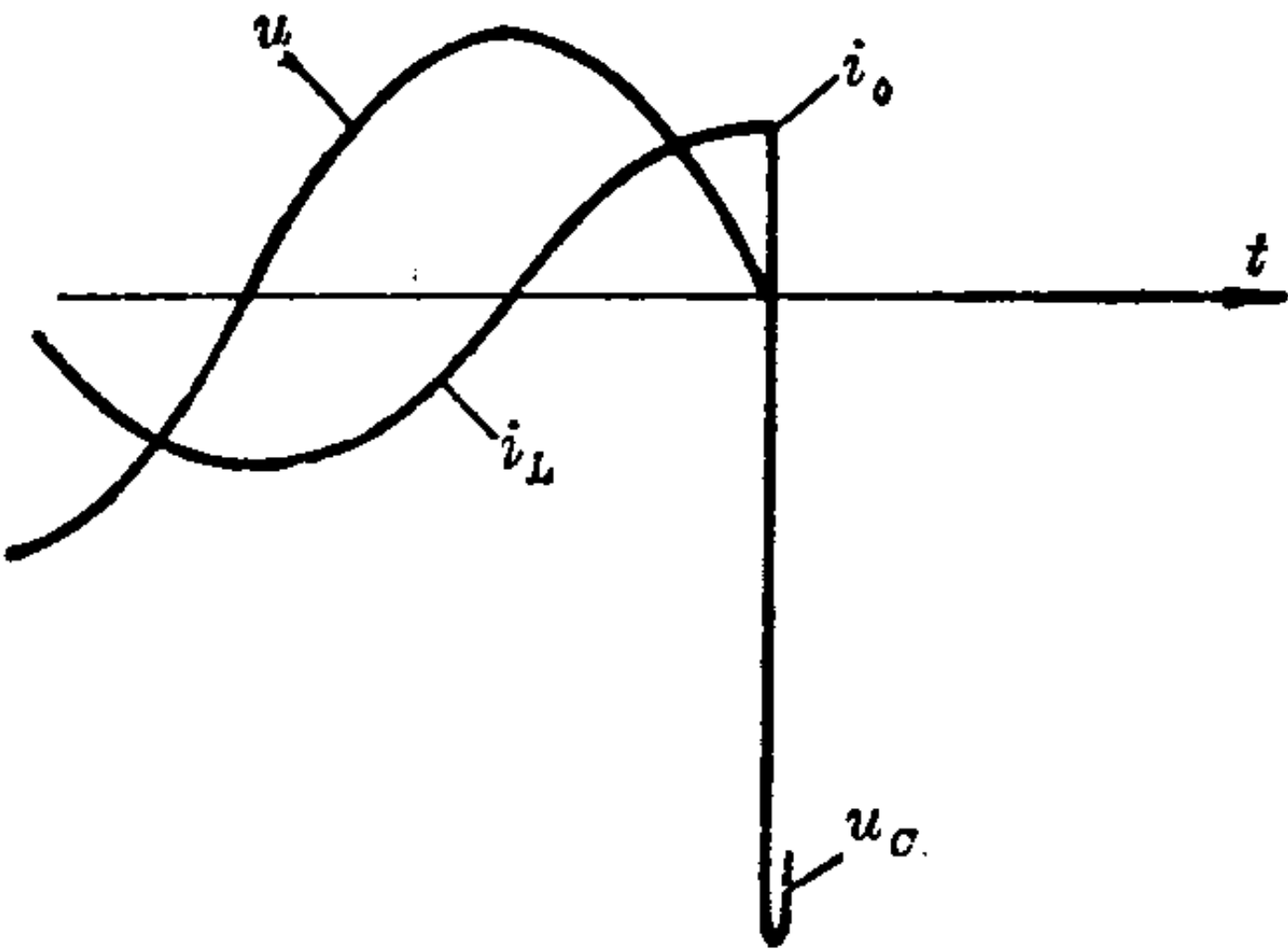


图 1-1

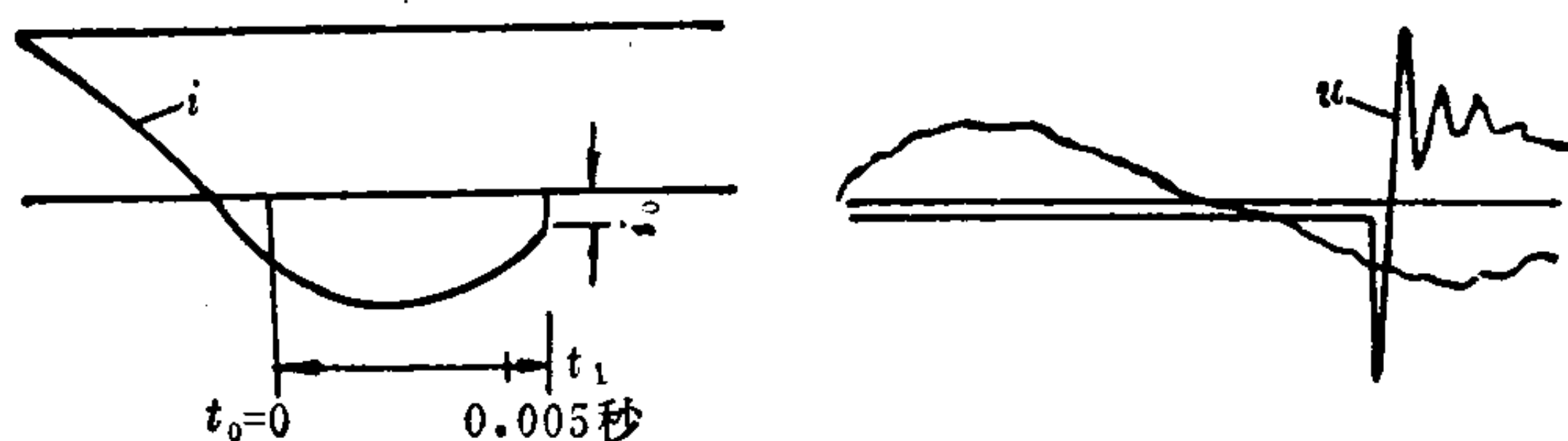


图 1-2 用空气断路器切断电感电流

(30安, 20千伏, 50赫)

i —在电感负荷下断路器中的电流; i_0 —截断电流; u —断路器触头上的电压; t_0 —触头开始分开的时刻; t_1 —电流截断的时刻

即过电压有可能达到很高的数值。在某发电厂曾测得相线对大地过电压倍数竟达 7.4, 相间过电压倍数竟达 7.68。东北某变电所用多油断路器切 154 千伏空载变压器 ($I_L = 1.81\%$) 时, 在 29 个记录中过电压倍数最大达 4.8, 大于 3.0 的有 3 次。

仔细分析试验结果和运行经验以后, 可以发现, 影响切空变过电压幅值的因素有三:

1. 断路器的吹灭小电流电弧的能力以及断口之间绝缘强度恢复的速度。

2. 变压器绕组电容的大小以及变压器激磁电流的大小。

3. 断路器有无并联电阻以及断路器切断电流后变压器绕组上是否装有阀型避雷器。

在多油断路器或无压油活塞的少油断路器中, 吹灭电弧的能力是和被切电流直接相关的。被切电流越小, 断路器中电弧产生的气体越少, 吹灭电弧的能力也越小, 因此在切空载变压器时一般没有明显的电流瞬间截断现象, 所以过电压不大。但在空气断路器中或有压油活塞的少油断路器中, 由

于其吹弧能力不是或不完全是由被切电流决定的，因此在切空载变压器时，会有明显的电流瞬间截断现象，所以过电压可能很高。

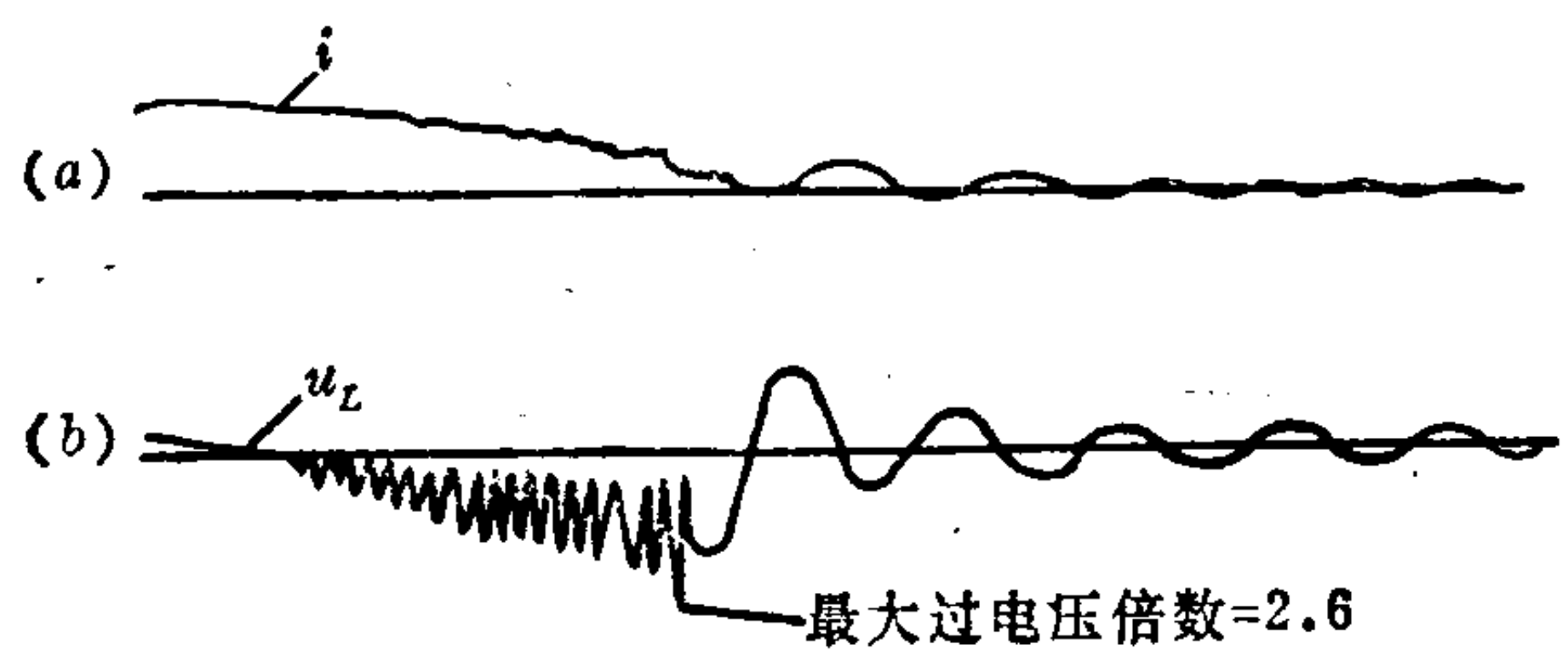


图 1-3 用油断路器切断电感电流（5安，15千伏）
(a) 电流的示波图；(b) 电感上电压的示波图

切空载变压器的过电压也同时作用在断路器的断口上，如果断路器断口的绝缘强度恢复很慢，则断口起限制过电压的作用。即断路器的重燃对限制切空载变压器过电压是有利的。

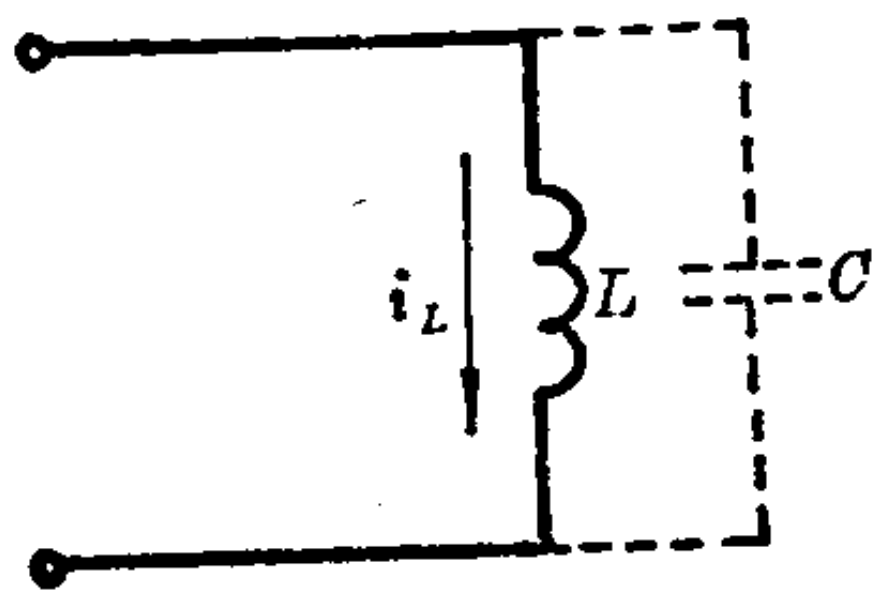


图 1-4

变压器绕组的电容 C 对过电压的幅值影响也很大。当电流在瞬时值为 i_0 时被强迫“截断”，电感 L 中的磁能 $\frac{1}{2} Li_0^2$ 将转变为储在电容 C 中的电能 $\frac{1}{2} Cu^2$ （参看图 1-4）。按能量不灭定律，

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} Li_0^2 &= \frac{1}{2} Cu^2, \\ \therefore u &= i_0 \sqrt{\frac{L}{C}}, \end{aligned} \tag{1-1-1}$$

式中 u 为 C 上的电压，也就是 L 上的过电压。由上式可见，

当绕组电容 C 较大时，过电压 u 将较小。

当变压器的激磁电流较小时，即使 i_L 在到达幅值时被截断，由（1-1-1）式可知，此时过电压也不大。

现代的高压变压器采用冷轧硅钢片，其激磁电流常仅达额定电流的0.5%左右（非冷轧硅钢片可达5%以上），同时由于采用了纠结式绕组，大大增加了绕组的电容 C ，所以在切这种变压器时，过电压倍数一般不大于2。

如果断路器的断口上有并联电阻 R_b ，则即使在电流等于 i_0 时分闸，电流仍可沿 R_b 流通，因此 L 中的电流不会突变到零，从而限制了过电压。但如 R_b 比激磁阻抗小得多（例如中值并联电阻 $R_b = 1000 \sim 3000$ 欧），则当拉开 R_b 时会有比较大的“截断”电流现象，即仍会出现比较高的过电压。所以一般来说，只有高值并联电阻才能限制这种过电压（高值并联电阻 R_b 的值应与激磁阻抗值为同一数量级，一般约为几万欧）。

综上所述，只有在使用无高值并联电阻的空气断路器和有压油活塞的少油断路器去切断空载的老式变压器（非冷轧硅钢片及非纠结式绕组）时，才会产生较高的过电压。此时应当在变压器高压侧与断路器间装设阀型避雷器。由于空载变压器绕组的磁能比阀型避雷器允许通过的能量要小得多，所以这种保护是可靠的。应当指出，由于这组避雷器是保护内过电压的，所以在非雷雨季节也不要退出运行。如果变压器高低压电网中性点接地方式是一个类型的（例如都是直接接地），那末可不在高压侧装这组阀型避雷器，而只在低压侧装阀型避雷器，这样就经济方便多了。但是如果高压侧电网中性点是直接接地的，而低压侧电网中性点不是直接接地的，那末只在变压器低压侧装普通阀型避雷器来保护高压侧

拉闸过电压就不够了，此时需在低压侧装设磁吹阀型避雷器才行^①。

习 题●

1. 110千伏三相变压器（中性点直接接地），容量为31.5兆伏安，激磁电流为5%。FZ-110J 避雷器允许通过矩形波电流5千安（10微秒），此时其残压为260千伏。试校验切该空变时用它来保护变压器的可能性。

*2. 330千伏三相变压器（中性点直接接地），容量为260兆伏安，激磁电流为0.5%。FCZ-330J 避雷器允许通过矩形波电流10千安（10微秒），此时残压为820千伏。试校验该切空变时用它来保护变压器的可能性。

*3. 110/220千伏三相变压器（两侧中性点直接接地），容量为120兆伏安，激磁电流为0.5%。两侧绕组每相电容为20000微微法。计算切空变过电压的理论最大值。

4. 不在变压器高压侧，而只在低压侧直接装避雷器，切高压侧空变时能否保护变压器？

5. 中性点不接地的变压器，如只在变压器中性点上装避雷器，切空变时能否保护变压器？

6. 切断有负载的变压器时为什么不会产生过电压？

第二节 切、合空载线路过电压

电网中用断路器切、合空载线路（以下简称空线）是一

① 这是因为此时高压侧用的是80%的避雷器，而低压侧用的是100%的避雷器，两者的残压不与其额定电压成正比，详情参看本书第一章第十一节和第二章第七节。

② 有*号者可不作，以下各章节同此。

种常见的常规或故障操作方式。在这种操作过程中也会产生过电压，后者能波及整个电网。过去，由于断路器熄灭小电流的能力不够强，我国1954~1969年在切220千伏空线时，变电所中曾发生过13次故障：例如东北电网用空气、少油和多油断路器切合空线时曾发生过8次故障，华东电网用空气断路器切合空线时曾发生过3次故障。此外，在切合35~66千伏线路时，变电所中也曾发生过一些事故。应当指出，造成这些故障的断路器多半是进口的（例如苏联的BB-220等）。由于国产断路器的质量不断提高，这类故障正逐渐减少。

运行经验证明，所用断路器的灭弧能力不够强，以致电弧在触头间重燃时，切空线的过电压事故就比较多。电弧在触头间的每次重燃实质上等于线路的又一次合闸。下面我们从最简单的空线向电源合闸的情况出发，来分析过电压产生的机理。

参看图1-5，我们把空线用一个等值的T形回路代替。在这个回路中， L 是线路的电感， C 是线路的对地电容。此时 $\frac{1}{2}L$ 与 C 组成的振荡回路，对一般线路来说，其振荡频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)C}}$$

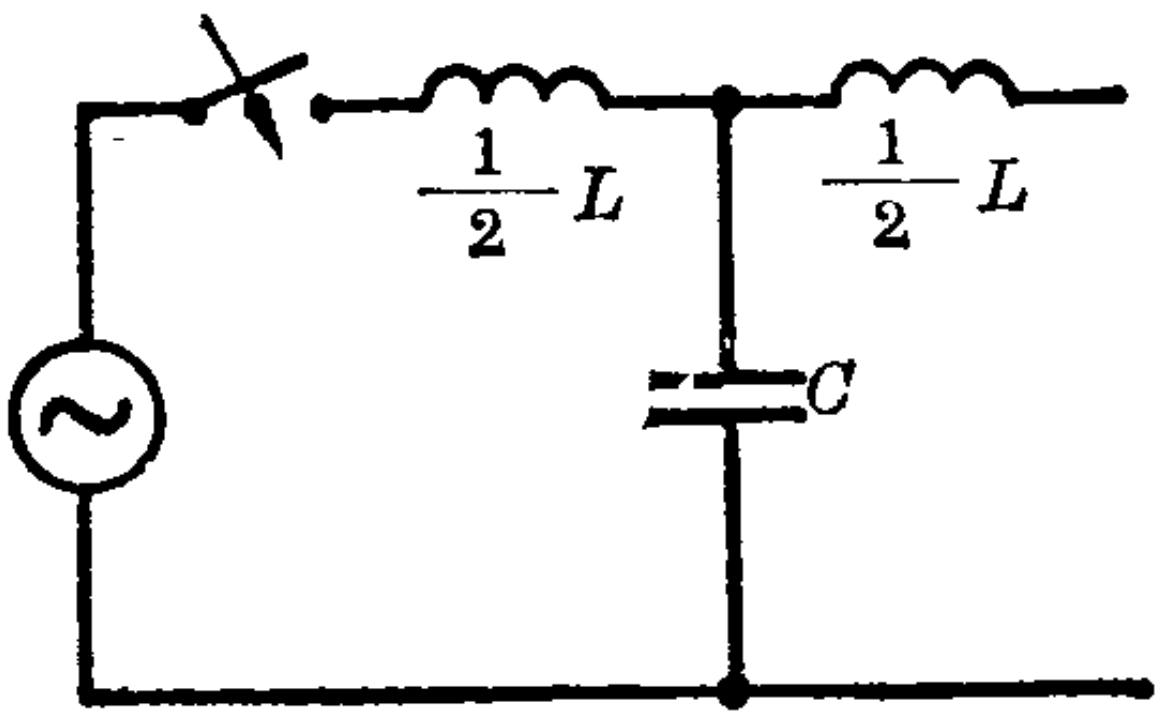


图 1-5

要比工频高得多。因此，可以认为：为求出在过渡过程中 C 上的过电压，可假设电源电压近似地保持不变，如果在电源电压接近幅值时合闸，由于这时电源电压变化较慢，这一假设就更接近于实际了。这样，空线的合闸可以简化成图 1-6 的 $L'-C$ 振荡回路合闸于直流电势的情况，图中 $L' = \frac{L}{2}$ ，而直流电势等于电网工频相电压的幅值 U_{xg} （这一般相当于最严重的情况）。根据电路第二定理，可以写出

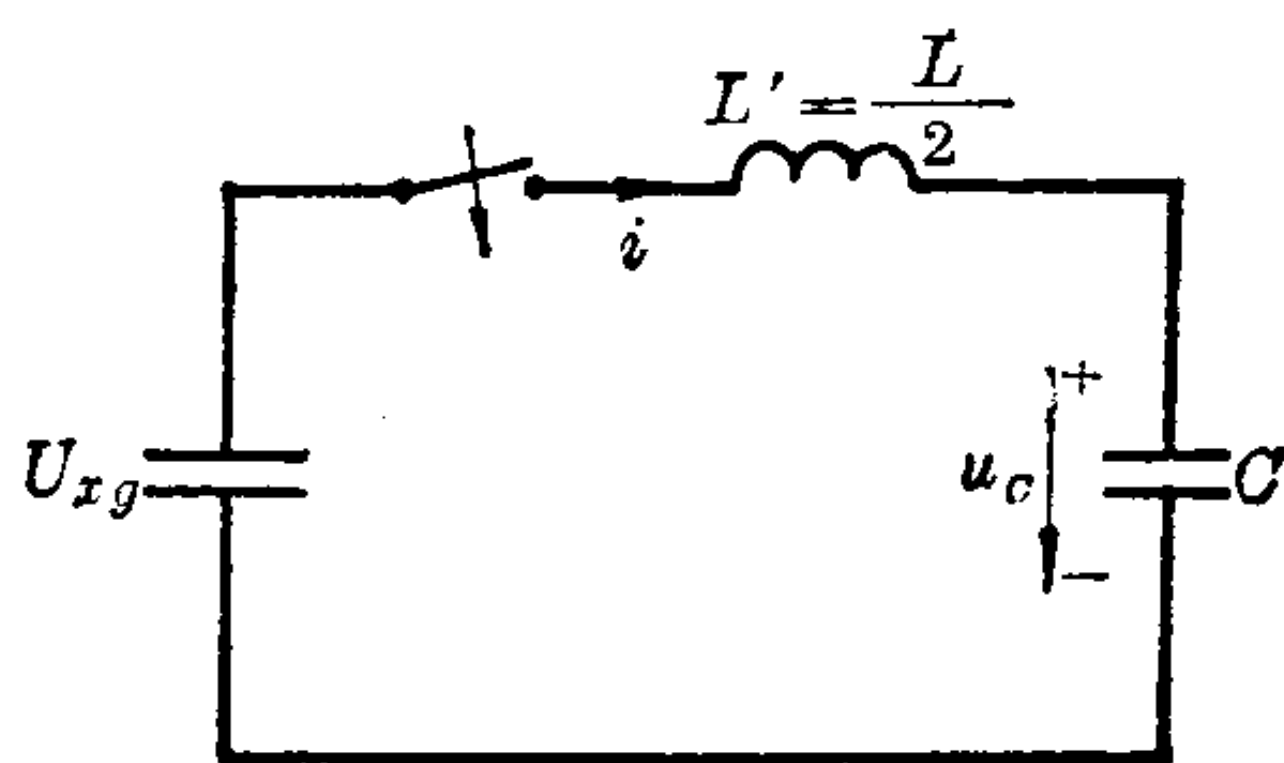


图 1-6

$$U_{xg} = u_{L'} + u_C, \quad (1-2-1)$$

式中 $u_{L'} = L' \frac{di}{dt},$

$$u_C = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int_0^t i dt.$$

因此，电路方程可写成为

$$L' \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = U_{xg}. \quad (1-2-2)$$

我们现在来分析物理过程中 i 和 u_C 随时间的变化。在时刻 t_1 （参看图1-7），显然 C 上电荷 q 为零，即 $u_C = 0$ ，而 $u_{L'}$