

过电压及保护

(增订版)

解广润主编

电力工业出版社

过电压及保护

(增订版)

解广润 主编

电力工业出版社

过电压及保护

(增订版)

解广润 主编

*

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

*

787×1092毫米 32开本 17.25印张 383千字

1977年8月北京第一版

1980年6月增订第二版 1980年6月北京第一次印刷

印数 00001—16580册 定价 1.25元

书号 15036·4040

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。在叙述上使广大读者易于掌握，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读者易于掌握本书，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。在正文中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。

为适应高等学校教学加强理论的需要,在本书增订版中我们增添了两个附录(附录Ⅷ、Ⅹ),主要讲述关于分布参数电路和集中参数电路过渡过程的较完善的计算方法。

本书为从事电气工作的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有关专业的教学参考书。限于我们的业务水平,书中错误和缺点在所难免,欢迎读者提出宝贵意见。

本书由解广润同志主编,陈慈萱同志编写了避雷器部分和附录Ⅹ,江日洪同志编写了附录Ⅶ,方瑜、程启武、张元芳等同志参加了书稿的加工。仇启琴同志主持了校对工作。王遵和刘继同志对本书提供了大量宝贵意见,原水利电力部《过电压规程和接地规程》修订组为本书提供了大量数据和资料,对此我们表示衷心地感谢。

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 用特性线法解导线上的过渡过程	505
附录 IX 计算过渡过程的状态变量法及其在变压器波过 程分析上的应用	513
附录 X 习题答案	536

绪 论

电力系统的工作可靠性是和其绝缘水平与过电压大小密切相关的。过电压是指超过正常运行电压并可使电力系统绝缘或保护设备损坏的电压升高。据统计，在电力系统各种事故中，绝缘事故占主导地位，而在绝缘事故中由于过电压引起的事故又占主导地位。过电压保护工作做好了，不仅可以使电力系统安全运行，而且还能降低电力系统的造价与减少运行维护的工作量。

过电压可以分为内部过电压和大气（外部）过电压。

内部过电压是由于电力系统内部能量的转化或传递引起的，它可以是在系统参数发生变化的过渡过程中出现的，也可以是在变化后的网络参数处在工频谐振或谐波频率谐振的稳定状态中出现的。引起系统参数发生变化的主要原因是开关开断或合上某一线路或设备，以及电力系统发生了故障（断线或绝缘击穿等）。

内过电压的幅值是和电力系统的运行电压密切相关的，所以通常用电力系统最高运行相电压 U_{ag} 幅值的倍数来表示。最高运行相电压可能比额定相电压高出15%（对220千伏及以下的系统而言）或10%（对330千伏及以上的系统而言）。内过电压的范围通常为 $(2.2 \sim 4) U_{ag}$ ，其值和设备的性能（首先是开关的性能）以及电力系统的拓扑结构（首先是系统中性点的接地方式）有关。电气设备及线路在各种大气条件下（湿、污染等）应能耐受绝大部分的内过电压。因此，

降低内过电压不仅可以减少设备①的事故次数，而且可以降低设备及线路的造价；后者在超高压系统中有重大的经济意义。

大气过电压是雷云放电引起的，它可以分为直击雷过电压、感应过电压和流动波过电压。雷电放电的电压可达几千到上万千伏以上，其电流可达数百千安，当其直接对设备或线路导线放电时，是任何绝缘所无法直接承受得了的。所以在电力系统中广泛采用避雷针和避雷线将设备和线路加以保护。避雷针（线）必须有良好的接地（一般小于10欧）和足够的高度。感应雷是在设备或线路附近（几米到上百米）发生雷电放电时，在设备或导线上由于静电感应和电磁感应而产生的，其幅值可达300~400千伏，会使得35千伏及以下的设备或线路受到损害。流动波过电压是当远处线路的导线上有直击或感应雷时，电磁波沿着导线以光速流向发、变电所，而在发、变电所中出现的过电压，通常需用避雷器或间隙来将其加以限制，以保证发、变电所的绝缘不受危害。

电力系统中性点接地方式对内过电压的幅值和大气过电压受限制的程度（也就是避雷器的性能）有很大影响。中性点接地方式主要可分为大接地短路电流（入地电流大于500安）系统和小接地短路电流（入地电流在500安及以下）系统。前者一般是中性点直接接地，后者一般是系统中性点不接地或经消弧线圈接地。在前一种系统中的过电压较低，而在后一种系统中过电压较高。

电力系统中各种绝缘的抗电强度，应当和受限制后的过

① 国内外的运行经验表明：现在还没有发现过内过电压使得高压和超高压线路（即使绝缘水平比正常为低者）发生事故的例子。

电压值协调起来，这种关系叫做绝缘配合。对过电压研究得越透彻，绝缘配合就越有根据，从而可在经济的基础上保证电力系统可靠地运行。

解放后，我们在过电压工作中已积累了不少经验，在科研工作中也取得了不少成绩。从220伏低压配电系统到330~500千伏超高压系统的一套适合我国情况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行列。现在我们已经有了自己的雷电流参数曲线、内过电压统计曲线、避雷针（线）和线路防雷的设计方法以及发、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，成套500千伏设备也在生产中。

我们在自力更生的基础上，努力吸取各国先进的过电压科学技术，一定能在不久的将来，在过电压保护工作上取得更大的成就，为祖国的四个现代化作出贡献。

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_{ϕ} 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

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

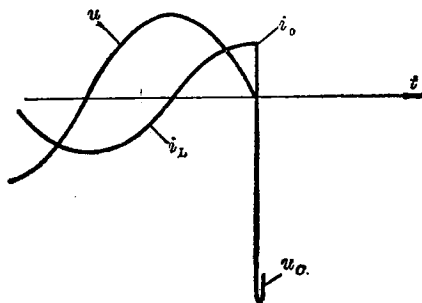


图 1-1

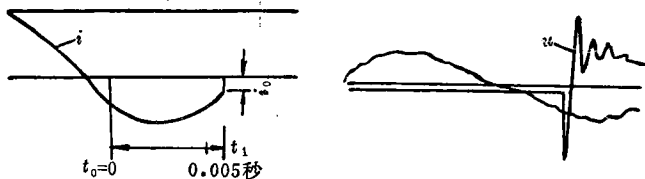


图 1-2 用空气断路器切断电感电流
(30安, 20千伏, 50赫)

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。

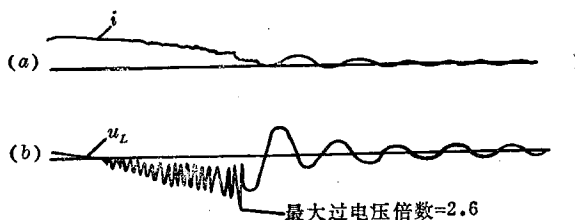


图 1-3 用油断路器切断电感电流（5安，15千伏）
(a) 电流的示波图；(b) 电感上电压的示波图

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。

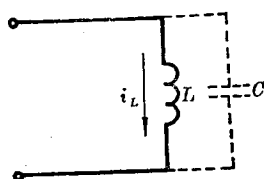


图 1-4

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，

$$\frac{1}{2} Li_0^2 = \frac{1}{2} Cu^2,$$

$$\therefore u = i_0 \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (1-1-1)$$

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_0 ，则即使在电流等于 i_0 时分闸，电流仍可沿 R_0 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_0 比激磁阻抗小得多（例如中值并联电阻 $R_0 = 1000 \sim 3000$ 欧），则当拉开 R_0 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_0 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^②

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。