

内部过电压基础

陈 维 贤

水利电力出版社

内 容 提 要

本书叙述电力系统内部过电压的基础物理概念和主要的限制措施,汇集和反映了多年来的运行经验、试验数据和研究成果,可供高压及其它电气技术人员阅读,也可作为高等院校有关专业师生的参考读物。

内部过电压基础

陈 维 贤

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

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

*

787×1092毫米 32开本 8.25印张 183千字

1981年12月第一版 1986年12月北京第二次印刷

印数 7351—10860 册 定价 1.55 元

书号 15143·6265

前 言

内部过电压在各级电网中频繁发生，采取合理和妥善的措施加以防止或限制，能在很大程度上提高供电和电气设备运行的可靠性，这对我国现有的和大量兴建的高压和超高压电网乃是十分必要的，因此在当前情况下，编著一本内部过电压的基础书籍看来是适时的。

建国三十年来，我国各地有关的高压工作者进行了持续不断的内部过电压的研究工作，特别是最近几年来，通过广泛的电网实测和模拟研究，掌握了新的大量的统计数据和取得了显著成果。在国外，内部过电压的研究文献也大量地公布在各类书刊杂志中。对于这些浩瀚的技术资料和复杂的内部过电压现象，作者并不奢望在本书不大的篇幅中加以详尽的全面叙述，而是力求以深入浅出的方式介绍内部过电压的基础知识，以使初学者能够掌握主要的物理概念和实际的解决办法，而有关的专业人员则可能从中获取一些有益的资料和研究结论。

本书原为吉林电力试验研究所于1977年举办的短训班而编写；在该所的大力支持下，事先进行了较长时间的调查研究和资料收集工作；初稿完成后，曾以讲义形式由吉林电力试验研究所和湖北电力试验研究所印发；接着以此作为主要教材，先后在中南、东北和华东地区举办了几期短训班，讲义中的部分章节也曾作为武汉水利电力学院七五届高压专业学生的授课内容。通过这些教学实践，现在进行较大的修改

和补充，以供正式出版。

在写作本书过程中，得到了许多单位和同志们的热情支持，提供了丰富的技术资料和试验数据，如吉林电力试验研究所，湖北电力试验研究所，东北电业管理局技术改进局，辽宁电厂，黑龙江、河南、江苏、浙江、山东、四川和重庆电力试验研究所，浙西供电局等。清华大学吴维韩副教授审阅了本书原稿。武汉水利电力学院高压教研室方瑜同志参加了本书的资料收集和短训班的教学工作，数学教研室程麟趾同志曾参加本书第一章第四节的初期编写工作。谨此向他们表示深切的谢忱。

由于作者的水平所限，书中内容定有许多不当之处，期待着读者提出多方面的更正和补充意见。

目 录

前 言	
绪 论	1
第一章 基础知识	3
1-1 长线路及其等值电路	3
1-2 拉氏变换	10
1-3 过渡过程	17
1-4 统计分析方法的应用	26
第二章 共振过电压的分类和一般特性	50
2-1 共振现象	50
2-2 共振过电压的分类	52
2-3 线性共振现象	53
2-4 参数共振现象	56
2-5 铁磁共振现象	59
第三章 线性共振过电压	75
3-1 长线路的电容效应	75
3-2 不对称短路引起的工频电压升高	81
3-3 甩负荷引起的工频电压升高	89
3-4 消弧线圈补偿电网中的线性共振现象	92
3-5 传递过电压	99
第四章 同步电机的自励磁过电压	117
第五章 铁磁共振过电压	123
5-1 引言	123
5-2 断线过电压	123
5-3 电磁式电压互感器引起的铁磁共振过电压	137
5-4 产生铁磁共振的其它若干接线方式	157

第六章	弧光接地过电压和消弧线圈	167
6-1	间歇性电弧	167
6-2	物理现象	169
6-3	实际发展过程和过电压的危害性	172
6-4	防止措施	173
6-5	消弧线圈	175
第七章	空载线路的分闸过电压	179
7-1	概述	179
7-2	物理过程	180
7-3	影响过电压的因素和某些实测数据	184
7-4	限制措施	187
第八章	空载变压器和电动机的分闸过电压	193
8-1	概述	193
8-2	截流现象	195
8-3	物理过程	198
8-4	实际发展过程及其限制措施	201
8-5	消弧线圈补偿电网中切除接地故障时引起的过电压	208
8-6	电动机的分闸过电压	211
第九章	空载线路的合闸过电压	222
9-1	合闸过电压的物理过程及其意义	222
9-2	残余电压及其测定	224
9-3	重合闸过电压的最大幅值的估算	230
9-4	合闸过电压的主要影响因素和余弦电容器的合闸涌流	232
9-5	几种限制措施	235
第十章	限制操作过电压的几种设备	240
10-1	概述	240
10-2	合闸过电压的V形曲线	242
10-3	合闸电阻的阻尼作用——第一阶段合闸过电压	243
10-4	短接并联电阻——第二阶段合闸过电压	246
10-5	避雷器的安放位置和对阀片的要求	250
10-6	避雷器的灭弧条件	255
参考文献		257

绪 论

在电力系统内部，由于断路器操作和各类故障所引起的过渡过程，将会产生瞬间的电压升高，称为操作过电压；同时，在电感电容参数的适当配合下，也会产生多种形式的持续时间很长的共振现象及其电压升高，称为共振过电压。它们统称为内部过电压。大家知道，另一种由于雷击引起的过电压称为雷电过电压，又称外部过电压或大气过电压。

内部过电压是在电网额定电压的基础之上产生的，故其幅值大体随着后者的升高而按比例增大。通常，在中性点直接接地的电网中，如果不采取限压措施，最大的过电压可能达到额定电压的三倍以上；对于中性点非直接接地的电网中，则可达四倍以上。

在220千伏及以下的电网中，根据现有绝缘配合的原则，设备的绝缘强度应能耐受得住持续时间以毫秒计的操作过电压的作用，因而后者一般是不危险的。对于共振过电压，虽然我们要求在设计电网之前进行必要的估算和调整，力求避免发生，但是由于电网结线 and 操作、故障形式的多样性，实际却远非如此；运行经验表明，特别是在35千伏及以下的广大电网中，由于共振过电压的作用时间的持久性质，也由于铁芯磁饱和所引起的巨大的过电流，使得绝缘的闪络和击穿事故以及互感器、熔丝、避雷器等的烧毁和爆炸事故比较频繁发生，成为一个值得注意的普遍问题。因此，对于这种电网，我们把着重点放在共振过电压，汇述了国内的运行事例

和我们多年来试验研究的结果，同时也介绍了若干典型的操作过电压。

超高压电网的绝缘要求主要取决于操作冲击水平，为了提高电网的技术经济指标，必须首先强迫性地降低操作过电压，为此我们将着重叙述这种电网内操作过电压的性能特点及其限制措施。

本书首先扼要地介绍计算和分析内部过电压用的若干基础知识，接着分别叙述各类共振过电压和操作过电压。值得注意的是，实际电网中出现的过电压现象往往比较复杂，有时甚至多种不同类型的过电压同时或相继发生，因而头绪纷繁，难以把握，这就需要运行值班人员逐步地加深领会各类过电压的主要特征及其产生条件，结合运行经验和有限的现场数据，力求对每次事故的主要原因作出比较正确的分析判断，并能提出相应合理的防护对策。

内部过电压的研究已有悠久的历史，最近二、三十年来，超高压电网的建立和迅速发展又大大地促进了这一研究工作。为了实现四个现代化，新的大量的超高压电网正在我国加速建立，进一步地研究内部过电压及其限制措施，毫无疑问将会提高电网结构的经济性和运行的可靠性。目前，许多地区正在建立和完善内部过电压的模拟装置，并开展了计算机研究和理论分析工作。可以预期，通过广泛的协作和坚持不懈的努力，我国内部过电压的研究工作将会迅速地提升到世界水平的新高度。

第一章 基础知识

1-1 长线路及其等值电路

电网中的内部过电压主要发生在由长线路和电源系统组成的振荡回路中，我们先来讨论长线路方程及其等值电路。

当长线路中通过电流时，在其周围产生磁场，链过磁通，即表现为一定的电感压降，为了反映这一点，每一小段导线都用一个小电感表示；与此同时，每一小段导线还有一定的对地电容，图1-1中画出了这些小电感和小电容的分布情况。由于导线直径和对地距离处处相同，每个小回路中电感电容的大小应当相同，而且这样的小回路应有无穷多个。由此可知，长线路的电感电容是均匀分布的，而不是集中的，通常我们用每公里长导线的总电感 L 和总电容 C 来表达这一均匀分布参数的大小。

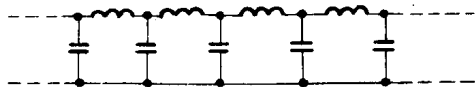


图 1-1 分布参数的长线路

这样一来，在对长线路进行运算时，必须借助于微分方程而求其等值参数。

在离线路终端 x 公里处，我们取长度等于 Δx 的一段导线，在此小段内的电感为 $L \Delta x$ ，电容为 $C \Delta x$ ，工频电流及其压降则用 I 、 U 及其微分形式表示，如图1-2所示。根

据电路定理，可以写出如下方程式：

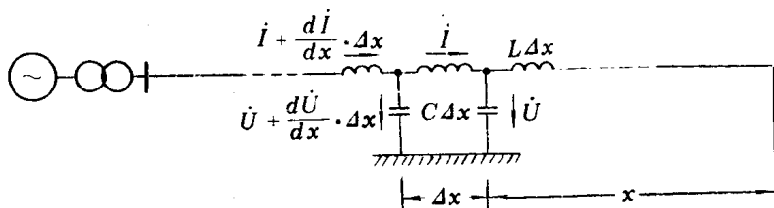


图 1 2 长线路的 Δx 段

$$\dot{U} + \frac{d\dot{U}}{dx} \cdot \Delta x - \dot{U} - \dot{I} j \omega L \Delta x = 0$$

即
$$\frac{d\dot{U}}{dx} = j \omega L \dot{I} \quad (1-1)$$

同时有
$$\dot{I} + \frac{d\dot{I}}{dx} \cdot \Delta x - \dot{I} = j \omega C \Delta x \left(\dot{U} + \frac{d\dot{U}}{dx} \Delta x \right)$$

略去上式中的二阶无穷小，整理得

$$\frac{d\dot{I}}{dx} = j \omega C \dot{U} \quad (1-2)$$

式 (1-1) 中对 x 微分，并将式 (1-2) 代入

$$\frac{d^2 \dot{U}}{dx^2} = j \omega L \frac{d\dot{I}}{dx} = -\omega^2 LC \dot{U} = -\left(\frac{\omega}{v}\right)^2 \dot{U} \quad (1-3)$$

式中 $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 为电磁波的传播速度；在三相电路中，架空

空线的正序传播速度约为光速，即 $v \approx 3 \times 10^5$ 公里/秒。

式 (1-3) 的解答为

$$\dot{U} = A \cos \frac{\omega}{v} x + B' \sin \frac{\omega}{v} x = A \cos \eta + B' \sin \eta$$

由式 (1-1) 得

$$\begin{aligned} i &= \frac{1}{j\omega L} \frac{d\dot{U}}{dx} = \frac{1}{j\omega L} \left(-A \frac{\omega}{v} \sin \eta + B' \frac{\omega}{v} \cos \eta \right) \\ &= \frac{1}{\sqrt{\frac{L}{C}}} (jA \sin \eta - jB' \cos \eta) \end{aligned}$$

式中 $\eta = \frac{\omega x}{v}$ 。令 $Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$ ，称为导线的波阻，并使 $B' = jB$ ，以上两式可改写为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{U} &= A \cos \eta + jB \sin \eta \\ i &= \frac{1}{Z} (jA \sin \eta + B \cos \eta) \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

这是长线路的两个基本方程，系数 A 、 B 决定于线路的边界条件。例如，在图1-3中， $x = 0$ ， $\eta = 0$ ， $\dot{U} = j\omega L_0 \dot{i}$ 代入式(1-4)

$$A = \frac{j\omega L_0}{Z} B$$



图 1-3 终端接有电抗器的空载线路

故式 (1-4) 变为：

$$\begin{aligned} \dot{U} &= jB \left(\frac{\omega L_0}{Z} \cos \eta + \sin \eta \right) \\ i &= \frac{B}{Z} \left(-\frac{\omega L_0}{Z} \sin \eta + \cos \eta \right) \end{aligned}$$

在首端, $x = l$ $\eta = \frac{\omega l}{v} = \lambda$ 电压和电流应为:

$$\dot{U} = jB \left(\frac{\omega L_0}{Z} \cos \lambda + \sin \lambda \right)$$

$$\dot{i} = \frac{B}{Z} \left(-\frac{\omega L_0}{Z} \sin \lambda + \cos \lambda \right)$$

式中

$$\lambda = \frac{\omega l}{v} = \frac{100 \pi l}{3 \times 10^5} \text{ 弧度} = \frac{100 \times 180^\circ l}{3 \times 10^5} = 0.06^\circ l$$

这样, 从首端往终端看去的入口阻抗 Z_r 为

$$\begin{aligned} Z_r = \frac{\dot{U}}{\dot{i}} &= jZ \frac{\frac{\omega L_0}{Z} \cos \lambda + \sin \lambda}{-\frac{\omega L_0}{Z} \sin \lambda + \cos \lambda} \\ &= jZ \frac{\operatorname{tg} \varphi \cos \lambda + \sin \lambda}{-\operatorname{tg} \varphi \sin \lambda + \cos \lambda} \\ &= jZ \frac{\sin \varphi \cos \lambda + \cos \varphi \sin \lambda}{-\sin \varphi \sin \lambda + \cos \varphi \cos \lambda} \\ &= jZ \operatorname{tg}(\lambda + \varphi) \end{aligned} \quad (1-5)$$

式中

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L_0}{Z}$$

如果终端开路, $L_0 \rightarrow \infty$, $\varphi = 90^\circ$, 入口阻抗等于

$$Z_r = -jZ \operatorname{ctg} \lambda \quad (1-6)$$

在终端短路情况下, $\varphi = 0$, 则有

$$Z_r = jZ \operatorname{tg} \lambda \quad (1-7)$$

在一般情况下, 如果我们已知线路终端的电压 $\dot{U}_2$ 和电

流 $\dot{I}_2$ ，由式(1-4)，令 $x = 0$ ， $\eta = 0$ ，得

$$\dot{U}_2 = A, \quad \dot{I}_2 = \frac{B}{Z}$$

故首端电压 $\dot{U}_1$ 和电流 $\dot{I}_1$ 可以写成下列形式

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= A \cos \lambda + j B \sin \lambda \\ &= \dot{U}_2 \cos \lambda + j \dot{I}_2 Z \sin \lambda \end{aligned} \quad (1-8)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{1}{Z} (j A \sin \lambda + B \cos \lambda) \\ &= j \frac{\dot{U}_2}{Z} \sin \lambda + \dot{I}_2 \cos \lambda \end{aligned} \quad (1-9)$$

这样，如果我们只需了解线路两端的电压和电流，而不要求了解线路中间各点的电压和电流的变化规律，那么直接利用式(1-8)和(1-9)就够了。在这种情况下，可把整个线路用一个方框代表，而只引出其首端和终端的四个端头，这种接线图称为四端网络，如图1-4所示。

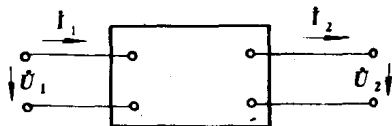


图 1-4 长线路的四端网络

根据式(1-8)和(1-9)，四端网络的方框可用集中电感和集中电容组成的等值回路来表示，例如，可以采用图1-5 (a)的“T”形接线方式，或图1-5 (b)的“ π ”形接线方式。

现在我们求“T”形电路的等值参数 L_T 和 C_T 。通过电容 C_T 的电流 $\dot{I}_c$ 为

$$\dot{I}_c = \left(\dot{U}_2 + \dot{I}_2 j \omega \frac{L_T}{2} \right) j \omega C_T$$

故有

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{I}_2 + \dot{I}_c = \dot{I}_2 + \left(\dot{U}_2 + \dot{I}_2 j \omega \frac{L_T}{2} \right) j \omega C_T \\ &= \dot{U}_2 j \omega C_T + \dot{I}_2 \left(1 - \frac{\omega^2 L_T C_T}{2} \right) \end{aligned} \quad (1-10)$$

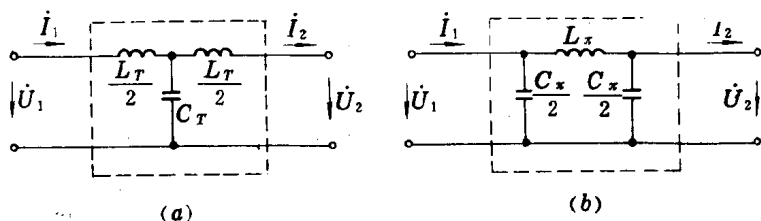


图 1-5 长线路的“T”形等值电路(a)和“π”形等值电路(b)

首端电压为

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 + \dot{I}_2 j \omega \frac{L_T}{2} + \dot{I}_1 j \omega \frac{L_T}{2} \\ &= \dot{U}_2 + \dot{I}_2 j \omega \frac{L_T}{2} + \left[\dot{U}_2 j \omega C_T \right. \\ &\quad \left. + \dot{I}_2 \left(1 - \frac{\omega^2 L_T C_T}{2} \right) \right] j \omega \frac{L_T}{2} \\ &= \dot{U}_2 \left(1 - \frac{\omega^2 L_T C_T}{2} \right) + \dot{I}_2 j \omega \frac{L_T}{2} \\ &\quad \times \left(2 - \frac{\omega^2 L_T C_T}{2} \right) \end{aligned} \quad (1-11)$$

可以看出, 式 (1-10) 和 (1-11) 同式 (1-9) 和 (1-8) 具

有相同的形式，为了满足等值条件，它们之间对应的系数应当相等，即

$$1 - \frac{\omega^2 L_T C_T}{2} = \cos \lambda \quad (1-12)$$

$$\frac{\omega L_T}{2} \left(2 - \frac{\omega^2 L_T C_T}{2} \right) = Z \sin \lambda \quad (1-13)$$

$$\omega C_T = \frac{\sin \lambda}{Z} \quad (1-14)$$

将式 (1-12) 代入 (1-13)

$$\omega L_T = \frac{2 Z \sin \lambda}{2 - \frac{\omega^2 L_T C_T}{2}} = \frac{2 Z \sin \lambda}{1 + \cos \lambda} = 2 Z \operatorname{tg} \frac{\lambda}{2} \quad (1-15)$$

因此，根据式 (1-14) 和 (1-15)，可以得出“T”形电路的等值参数。

按照同样方法，可以算出“π”形电路的等值参数

$$\omega L_\pi = Z \sin \lambda \quad (1-16)$$

$$\omega C_\pi = \frac{2}{Z} \operatorname{tg} \frac{\lambda}{2} \quad (1-17)$$

根据以上公式可知，下列关系式成立

$$\sqrt{\frac{L_\pi}{C_T}} = \sqrt{\frac{L_T}{C_\pi}} = Z \quad (1-18)$$

在工频情况下，如 $l \leq 300$ 公里，则有 $\sin \lambda \approx 2 \operatorname{tg} \frac{\lambda}{2} \approx$

λ ，等值参数可以近似写成

$$\left. \begin{aligned} L_\pi &\approx L_T \approx L l \\ C_\pi &\approx C_T \approx C l \end{aligned} \right\} \quad (1-19)$$

根据前述定义，上式的 L 和 C 可按波阻和波速算出

$$L = \frac{Z}{v}, \quad C = \frac{1}{Zv} \quad (1-20)$$

必须指出，“ π ”形和“ T ”形电路的四个参数均与 λ 有关，而 λ 又与角频率 ω 有关；当 ω 改变时，这些参数也随之改变。以后我们看到，在发生内过电压现象时，长线路中不仅通过工频电流，往往还通过其他频率的电流分量，因此根据工频算出来的各个等值参数并不能符合其他频率下的参数要求，即引起一定的误差。但是，如果我们不是用一个“ π ”形或“ T ”形回路代表全部长线路，而是用多个这样的回路来代表，那么每个等值回路就只代表较短的一段线路（通常不超过30公里），从而将误差限制到容许的限度内。例如，对于400公里的长线路，分为二十段，每段20公里，根据上面公式，计算20公里时的各个工频等值参数，再把二十个等值回路依次串联起来，就可将此分布参数的长线路转化为集中参数的等值电路，称为链形回路；通常，我们利用这种方法建立长线路的模拟装置，并用以从事内过电压的模拟研究工作。

1-2 拉氏变换

大家都很熟悉对数运算：将某一算式取对数，整理后查反对数，这就是答案。对数方法是一种数学变换，它将乘、除、乘方、开方等转化为简单的加、减运算。

拉氏变换是一种函数变换，它将函数和函数的积、微分方程转化为代数式和代数方程，然后再求反变换而得到最终解答，这就大大简化了计算步骤。这种方法又称运算微积。

设已知时间函数 $f(t)$ ，对它进行如下的变换（即拉氏

变换) 而得到新的函数 $F(P)$

$$F(P) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-Pt} dt \quad (1-21)$$

参数 P 称为算子, $F(P)$ 称为 $f(t)$ 的象函数, $f(t)$ 则是 $F(P)$ 的原函数, 记为

$$L[f(t)] = F(P)$$

下面列举几种简单的变换式, 详细公式可参看有关手册。

一、 $f(t) = A = \text{常数}$

由式(1-21), 得 $F(P) = \int_0^{\infty} A e^{-Pt} dt = \frac{A}{P}$, 即

$$L[A] = \frac{A}{P} \quad (1-22)$$

二、 $f(t) = e^{\alpha t}$

取 $\text{Re}(P) > \alpha$, 得

$$\begin{aligned} F(P) &= \int_0^{\infty} e^{\alpha t} e^{-Pt} dt = \int_0^{\infty} e^{(\alpha - P)t} dt \\ &= \frac{1}{\alpha - P} e^{(\alpha - P)t} \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{P - \alpha} \end{aligned}$$

$$\text{故} \quad L[e^{\alpha t}] = \frac{1}{P - \alpha} \quad (1-23)$$

令 $\alpha = j\omega$, 则 $L[e^{j\omega t}] = L[\cos \omega t + j \sin \omega t] =$

$$\frac{1}{P - j\omega} = \frac{P + j\omega}{P^2 + \omega^2}, \text{ 得}$$