

176996



电气试验技能培训教材

江苏省电力工业局 编
江苏省电力试验研究所

内 容 提 要

本书是根据部颁 DL/T 596--1996《电力设备预防性试验规程》和《电力工人技术等级标准》等新标准和要求,介绍了具体的电气试验原理、接线、可能的影响因素以及对试验结果的分析 and 判断方法。

本书主要内容有过电压和绝缘配合基本知识以及变压器、断路器、电力电容器、互感器、架空线路、电力电缆、避雷器、接地装置、绝缘子和高压套管、电瓷防污、发电机和电动机等高压电气设备的电气试验方法。

本书可作为电力企业从事高、低压电气设备试验人员的技能与考核培训教材,也可供电气专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电气试验技能培训教材/江苏省电力工业局,江苏省电力试验研究所编. -北京:中国电力出版社, 1998.8

ISBN 7-80125-698-0

I. 电… II. ①江…②江… III. 电气设备-试验-技术培训-教材 IV. TM-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 11774 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>)

三河市实验小学印刷厂印刷

各地新华书店经售

1998 年 9 月第 1 版 1998 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 24.75 印张 606 千字

印数 0001—6100 册 定价 39.80 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)

电力系统的发展与进步,使更高电压、更大容量以及新材料、新结构的高压电气设备不断出现,从事电气试验的队伍也不断扩大。电气试验及其培训工作就越来越重要。近年来,江苏省电力工业局根据华东电业管理局的培训计划,已经组织并举办了几期华东电网电气试验技能培训班,取得了较好成绩。本教材是在培训班讲义资料的基础上结合最新版本的国家标准和部颁标准进行整理编写的。编写中注意结合各个专业在实际试验工作中的经验以及具体工作中的典型事例,着重介绍试验技能和分析判断,注重理论与实践相结合,注重分析判断与具体事例相结合,既注重阐明基本原理,又力求做到深入浅出易于掌握。

本教材是在江苏省电力工业局科教处组织和指导下由江苏省电力试验研究所的工程技术人员负责编写的。全书包括过电压和绝缘配合、高压断路器、电力电容器、电力电缆、避雷器、绝缘子和高压套管、变压器、互感器、架空线路、接地装置、电瓷防污、发电机和电动机等高压电气设备的电气试验共十七章。第一章和第十三章由李长益同志编写,第二章由张宗九同志编写,第三章和第五章由张铁华同志编写,第四章由程明德同志编写,第六章由狄林铨同志编写,第七章和第八章由万达、陈昌已、张霁、时仁柱同志编写,第九章由吴益民同志编写,第十章由张霁和俞祖兴同志编写,第十一章由陈昌已同志编写,第十二章由岳健民同志编写,第十四章由孙伯燕同志编写,第十五、十六章和第十七章由梅强和刘娟同志编写。全书由张宗九、孙伯燕等同志统稿和审阅,杨福成和符厚群等同志对本书提出了许多宝贵意见。

由于编者的水平有限,而且电气试验技术还在不断发展,书中有不少错误和不足之处,恳望读者帮助指正。

编 者

1998年3月

前言

第一章 过电压及其绝缘配合	1
第一节 理论基础	1
第二节 雷电过电压	10
第三节 内部过电压	16
第四节 电力系统绝缘配合	22
第二章 高压断路器	27
第一节 高压断路器结构	27
第二节 断路器绝缘试验	38
第三节 SF ₆ 气体检漏及含水量测量	42
第四节 断路器特性试验	48
第三章 电力电容器	51
第一节 电容器基本概念	51
第二节 电力电容器结构	53
第三节 电力电容器试验	54
第四节 电容器组现场投切试验	57
第四章 电力电缆	60
第一节 电力电缆结构	60
第二节 高压电力电缆试验	71
第五章 避雷器	80
第一节 避雷器结构和原理	80
第二节 阀型避雷器试验	89
第三节 金属氧化锌避雷器试验	97
第六章 绝缘子和高压套管	102
第一节 绝缘子	102
第二节 高压套管	104
第三节 工厂试验	107
第四节 预防性试验	109
第七章 变压器绝缘试验	113
第一节 变压器绝缘结构	113
第二节 绝缘电阻和吸收比测量	125
第三节 泄漏电流测量	128

第四节	介质损耗因数 $\tan\delta$ 测量	129
第五节	变压器绝缘受潮判断实例	130
第六节	外施工频耐压试验	131
第七节	变压器三倍频耐压试验	140
第八节	大型变压器操作波试验	152
第九节	局部放电测量	164
第十节	绝缘油电气试验	177
第十一节	变压器常见故障综合判断方法	182
第八章	变压器特性试验	185
第一节	变压器变压比测量	185
第二节	变压器极性和组别测定	188
第三节	直流电阻测量	195
第四节	空载特性试验	197
第五节	负载特性试验	203
第六节	零序阻抗测量	207
第七节	声级测量	210
第九章	变压器分接开关	213
第一节	变压器分接开关结构	213
第二节	分接开关试验	222
第十章	互感器	225
第一节	互感器结构	225
第二节	互感器绝缘试验	233
第三节	互感器特性试验	262
第四节	互感器常见故障综合判断实例	269
第十一章	架空线路试验	272
第一节	概述	272
第二节	导线接头试验	272
第三节	绝缘电阻测量和核对相色	273
第四节	参数测量	274
第五节	长输电线路参数计算	280
第十二章	接地装置试验	283
第一节	接地装置组成和作用	283
第二节	接地电阻测量	284
第三节	测量土壤电阻率方法	289
第四节	接触电势、跨步电势及电位分布测量	291
第十三章	电瓷防污机理	293
第一节	介质表面脏污时沿面放电	293
第二节	影响脏污表面沿面放电因素	295

第三节	污秽绝缘子受潮时工频闪络电压试验	297
第四节	防止污秽闪络措施	298
第十四章	发电机定子绕组绝缘试验	300
第一节	定子绕组绝缘结构	300
第二节	定子绕组绝缘电阻、吸收比和极化指数测量	303
第三节	直流耐压试验	305
第四节	工频耐压试验	313
第五节	大型发电机定子绕组超低频耐压试验	318
第六节	定子绕组绝缘鉴定试验方法	321
第七节	定子绕组端部手包绝缘施加直流电压测量其表面对地电压 及泄漏电流试验	328
第八节	定子绕组槽部防晕层对地电位测量	330
第九节	发电机轴电压测量	330
第十节	发电机绝缘故障在线监测装置	332
第十五章	发电机转子故障检查试验	335
第一节	转子绕组接地故障点查找试验	335
第二节	检查转子绕组静态匝间故障试验	340
第三节	汽轮发电机组磁化与退磁	349
第十六章	发电机特性试验和参数测量	352
第一节	发电机空载特性试验	352
第二节	发电机短路特性试验	354
第三节	同步电抗测量	355
第四节	发电机次暂态和暂态参数测量	360
第五节	负序电抗测量	364
第六节	零序电抗测量	366
第七节	发电机灭磁时间常数测定	367
第八节	发电机直流电阻测量	370
第九节	定子铁芯损耗试验	372
第十节	相序检查和定相	375
第十七章	交流电动机试验	379
第一节	概述	379
第二节	定子绕组极性检查试验	379
第三节	电动机空载试验	380
第四节	电动机堵转试验	382
第五节	电动机定子绕组匝间绝缘试验	385
第六节	鼠笼型转子笼条故障检查	386

第一章 过电压及其绝缘配合

电力系统的各种电气设备在运行中除了要承受正常的系统电压外，还会受到各种过电压的作用。因而，了解各种过电压产生的机理及其对电气设备的危害，研究防止产生或限制幅值的措施，对系统及电气设备绝缘水平的选定有决定性的意义。本章就各种过电压的发生机理作初步介绍。

第一节 理论基础

一、直流电源作用在 LC 串联回路的过渡过程

从电路的观点看，电力系统中的各种电气设备都可以用 R 、 L 、 C 三个典型元件的不同组合来表示。其中 L 、 C 为储能元件，是过电压形成的内因，是作为分析复杂电路过渡过程的基础。现在，我们来研究直流电源作用于 LC 串联电路上的过渡过程及由之产生的过电压。

如图 1-1 所示，根据电路第二定理可写出

$$E = L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt \quad (1-1)$$

在未合闸时， $i = 0$ ， $u_C = 0$ ，变换一下形式，式 (1-1) 可写为

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + u_C = E \quad (1-2)$$

当满足 $t = 0$ 时， $i = 0$ ， $u_C = 0$ ，式 (1-2) 的解为

$$u_C = E(1 - \cos \omega_0 t)$$

式中， $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ ，而电路的电流则为

$$i = C \frac{du_C}{dt} = \frac{E}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \sin \omega_0 t \quad (1-3)$$

若 $u_C(0) \neq 0$ ，那么 u_C 的解为

$$u_C = E - [E - u_C(0)] \cos \omega_0 t \quad (1-4)$$

由上式可知， u_C 可以看作是由两部分叠加而成：第一部分为稳态值 E ，第二部分为振荡部分，后者是由于起始状态和稳定状态有差别而引起的，其幅值为（稳定值一起始值），见图 1-2。因此，由于振荡而产生的过电压

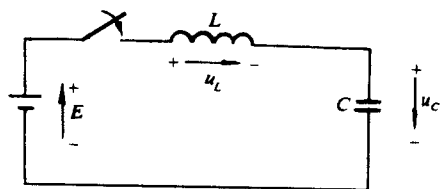


图 1-1 直流电源作用在 LC 串联回路上的过渡过程

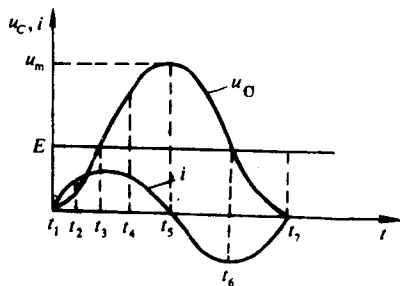


图 1-2 i 和 u_C 随时间的变化波形图

可以用下列更普遍的式子求出

$$\text{过电压} = \text{稳态值} + \text{振荡幅值} = 2 \times \text{稳态值} - \text{起始值} \quad (1-5)$$

利用上式,可以很方便地估算出由振荡而产生的过电压值。当然,实际的振荡回路中,电阻总是存在的,电阻的存在会使振荡波形最终衰减到稳态或甚至根本就振荡不起来,因此实际的过电压值总是小于该式的估算值。

二、交流电源作用于 LC 振荡回路

当 $e(t) = E_m \sin(\omega t + \varphi)$ 的交流电压作用于 LC 振荡回路时,可求得电容 C 上的电压为

$$u_C = E_m \cdot \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \cdot \sin(\omega t + \varphi) - E_m \cdot \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \cdot \left[\sqrt{\sin^2 \varphi + \left(\frac{\omega}{\omega_0} \cos \varphi \right)^2} \right] \cdot \sin(\omega_0 t + \psi) \quad (1-6)$$

其中前一项为强迫分量,后一项为自由振荡分量,并且有

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \psi = \text{tg}^{-1} \frac{\sin \varphi}{\frac{\omega}{\omega_0} \cos \varphi}$$

实际上,强迫分量对应于稳态分量,把它改写一下便可得

$$\begin{aligned} E_m \cdot \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \cdot \sin(\omega t + \varphi) &= E_m \cdot \frac{\frac{1}{LC}}{\frac{1}{LC} - \omega^2} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \\ &= E_m \cdot \frac{1}{1 - \omega L \cdot \omega C} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \\ &= - \frac{E_m \cdot \frac{1}{\omega C}}{-\frac{1}{\omega C} + \omega L} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (1-7)$$

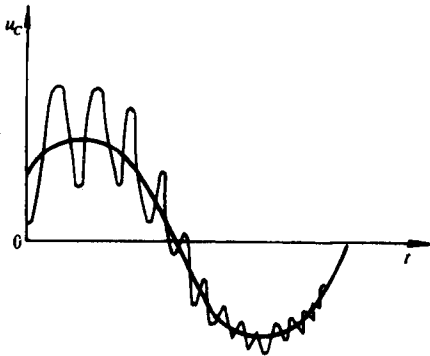


图 1-3 交流电源作用于 LC 振荡回路的 u_C 波形图

这完全和稳态分量一样,画出 u_C 的波形(见图 1-3),实际上就是在稳态电压上叠加一自由振荡分量,若实际的电路中有电阻存在,自由振荡分量最终衰减到零。

从式 (1-6) 及图 1-3 可以看出,电源合闸瞬间 u_C 上对应的电压为最大值时,由于振荡而引起的过电压为

$$u_{Cm} = 2E_m \left| \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \right| = 2E_m \left| \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2} \right|$$

一般 $\omega_0 \gg \omega$, $u_{Cm} = 2E_m$,与直流电源合闸于 LC 电路相类似,当电容 C 上有初始电压时,并且其方向与合闸初瞬所对应的稳态值相反时,振荡分量的

振幅就会大于 E_m ,从而使过电压的幅值大于 $2E_m$ 。

三、均匀无损线的波过程与波的折反射

典型的分布参数回路是各种传输线,沿线路长度有分布的电阻及电感,在导线和地之间

还有均匀分布的电容。对于雷电冲击波，由于等值频率很高，因此在研究雷电冲击波对导线的作用时，导线一般应按分布参数考虑。而对工频或操作波过电压，只有当线路较长时才把它们看作传输线。

不考虑损耗时，无损线的方程为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1-8)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (1-9)$$

该方程的解为

$$u = u_1(x - vt) + u_2(x + vt) \quad (1-10)$$

$$i = i_1(x - vt) + i_2(x + vt) \quad (1-11)$$

其中 $v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} = \text{光速}$

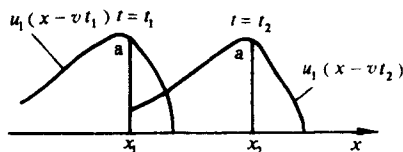


图 1-4 波的流动

这两个解表示：电压和电流的解都包括两个部分：

一部分是 $(x - vt)$ 的函数；另一部分是 $(x + vt)$ 的函数。这两个函数有一些什么性质呢？我们先来研究函数 $u_1(x - vt)$ ，该函数表明，架空线上某电压值出现的位置是随时间而变的。参见图 1-4，设某 $x_1 t_1$ 时， x_1 点的电压为 U_a ，则 t_2 时刻，电压为 U_a 的状态对应于 x_2 并应满足关系式

$$x_1 - vt_1 = x_2 - vt_2$$

任意时刻 t 时，电压为 U_a 的位置便可由下式求得

$$u_1(x - vt) = U_a$$

即 $x - vt = \text{常数}$

对上式两边求导得到 $\frac{dx}{dt} = v$ 。

这就意味着，对固定的 U_a 来说，它在空间的坐标 x 将以速度 v 向 x 轴的正方向移动。我们把 $u_1(x - vt)$ 称为前行电压波。同样，可以证明 $u_2(x + vt)$ 代表以速率 v 向 x 轴的负方向进行的波，显然传输线上的电流也是一个正向行波和反向行波的和，而且可表示为

$$u_1(x - vt) = Zi_1(x - vt) \quad (1-12)$$

$$u_2(x + vt) = -Zi_2(x + vt) \quad (1-13)$$

以上分析告诉我们，分布参数电路的过渡过程可以用流动波的图案来描述，导线上的电压分解成前行的电压波和反行的电压波；而流过导线的电流也分解成前行的电流波及反行的电流波，前行波和反行波在均匀无损的导线上无畸变地以波速 $v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} = \text{光速}$ 按各自的方向传播，两者互相独立，互不干扰。当两个波在导线上相遇时，可以把它们算术地相加起来。

电压行波与电流行波的关系由波阻抗 Z 决定，这些关系可综合成下述四个基本方程

$$u = u_q + u_f \quad (1-14)$$

$$i = i_q + i_f \quad (1-15)$$

$$u_q = Z \cdot i_q \quad (1-16)$$

$$u_f = -Z \cdot i_f \quad (1-17)$$

从这四个基本方程出发，加上边界条件和起始条件，求得相应导线上的前行波和反行波

后，就可以算出该导线上任一点的电压和电流了。

四、波的折反射及等值集中参数定理

上述我们已经过论了传输线上以光速向远处传播的电压波和电流波以及它们之间的关系，如果传输线是由两段波阻不同的导线组成时，导线 1 中电压波与电流波的比值，与导线 2 中电压波与电流波的比值不同，也就是说前行的电压波和电流波在两导线的连接点处将发生变化，从而造成了波的折射和反射。

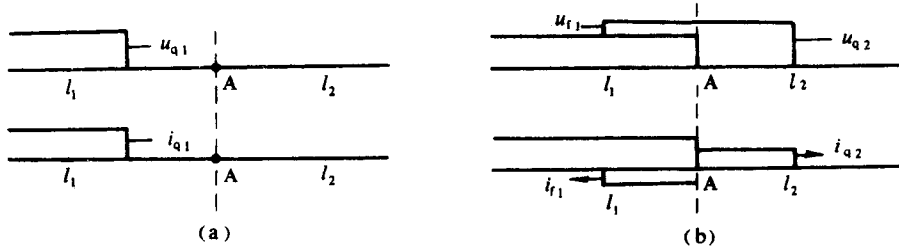


图 1-5 $Z_2 > Z_1$ 时波的折反射

(a) U_0 到达 A 点以前；(b) U_0 到达 A 点以后

以图 1-5 为例，设有一幅值为 U_0 的电压波沿导线 l_1 入射，在其未到达连接点 A 时，导线 l_1 上将只有前行电压波 $u_{q1} = U_0$ 以及相应的前行电流波 i_{q1} ，这些前行波到达 A 点后将折射为沿导线 l_2 前行的电压波 u_{q2} 和电流波 i_{q2} ，同时还出现沿导线 l_1 反行的电压波 u_{f1} 和电流波 i_{f1} ，由 A 点电压和电流的连续性可得

$$u_{q1} + u_{f1} = u_{q2} \quad (1-18)$$

$$i_{q1} + i_{f1} = i_{q2} \quad (1-19)$$

考虑到 $i_{q1} = \frac{u_{q1}}{Z_1}$; $i_{q2} = \frac{u_{q2}}{Z_2}$; $i_{f1} = -\frac{u_{f1}}{Z_1}$; $u_{q1} = U_0$ 。上两式可化成

$$U_0 + u_{f1} = u_{q2} \quad (1-20)$$

$$\frac{U_0}{Z_1} - \frac{u_{f1}}{Z_1} = \frac{u_{q2}}{Z_2} \quad (1-21)$$

求解方程式 (1-20) 及式 (1-21) 即可求得波在导线连接点 A 处的折反射电压和入射电压的关系式为

$$u_{q2} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} U_0 = \alpha U_0 \quad (1-22)$$

$$u_{f1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} U_0 = \beta U_0 \quad (1-23)$$

式中： α 为折射系数； β 为反射系数。它们表示式分别为

$$\alpha = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (1-24)$$

$$\beta = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (1-25)$$

应该指出，虽然折反射系数是根据两段波阻不同的导线相连接推导出来的，但它也可以适用于导线末端接有不同负荷电阻的情况，因为波阻为 Z 的无穷长导线在等值电路中相当于 $R = Z$ 的电阻。下面我们对几种特殊情况讨论一下波的折反射问题。

1. 线路末端开路

线路末端开路相当于 $Z_2 = \infty$ 的情况。此时根据式 (1-24) 及式 (1-25) 可算出 $\alpha = 2, \beta = 1, u_{q2} = 2U_0$ ，这一结果说明入射波 U_0 到达开路的末端后将发生全反射，全反射的结果是使线路末端的电压上升到入射波电压的两倍。由反射波电压及电流的关系可以看到，在电压全反射的同时，电流发生了负的全反射，从而使线路末端的电流为零，如图 1-6 所示。

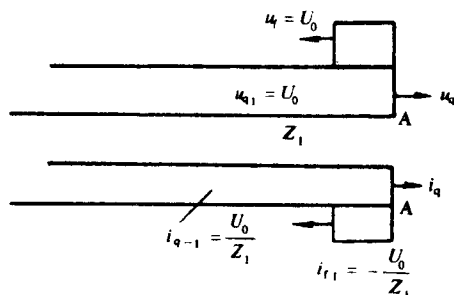


图 1-6 线路末端开路时波的折、反射

2. 线路末端接有电阻 $R = Z_1$

这种情况下，由式 (1-24) 和式 (1-25) 可求得 $\alpha = 1, \beta = 0, u_{q2} = U_0, u_{f1} = 0$ 。也就是说，波到线路末端 A 点时不发生反射，和均匀导线的情况完全相同。因此在高压测量中，人们常在电缆末端接以和电缆波阻相等的电阻来消除波在末端折反射所引起的测量误差。

3. 线路末端接任意阻抗（等值集中参数定理）

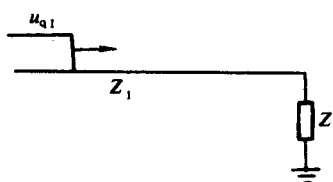


图 1-7 线路末端接有阻抗 $Z (Z \neq Z_1)$ 时波的折、反射

当线路末端接有任意阻抗 Z (见图 1-7) 时，应满足条件

$$u_{q2} = i_{q2} \cdot Z \quad (1-26)$$

电压波到达末端时，还应有下列关系

$$u_{q1} + u_{f1} = u_{q2} \quad (1-27)$$

$$i_{q1} + i_{f1} = i_{q2} \quad (1-28)$$

式 (1-28) 乘以 Z_1 并与式 (1-27) 两边相加，利用关系式 $u_{q1} = i_{q1} \cdot Z_1, u_{f1} = -i_{f1} \cdot Z_1$ 便可得

$$2u_{q1} = u_{q2} + i_{q2}Z_1 = i_{q2}(Z_1 + Z) \quad (1-29)$$

或

$$2i_{q1} = \frac{u_{q2}}{Z_1} + i_{q2} \quad (1-30)$$

公式 (1-29) 的等值电路图如图 1-8 所示，这就是所谓的等值集中参数定理：在有波流动时，可以用集中参数的等值电路来计算接点的电压和电流。此时等值电路中的电源电动势应取为来波电压的两倍，等值电路的内阻应取为来波所流过的通道的波阻。而式 (1-30) 则可将来波改成电流源以适应来波为电流源的情况（如雷电流）。应当注意的是，应用等值集中参数定理时，只能考虑行波的一次折反射，当计算的接点处有多次折反射时，则应分别计算。

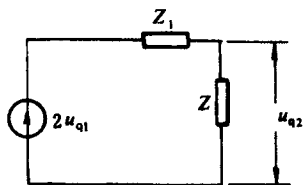


图 1-8 等值集中参数定理示意图

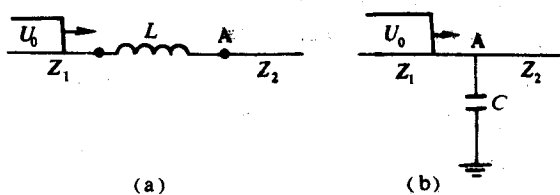


图 1-9 传输线中串有电感或并有电容
(a) 串有电感；(b) 并有电容

应用等值集中参数定理还可计算传输线中接有集中参数的储能元件时的过渡过程及波的折反射。如图 1-9 所示，传输线中串有电感或并有电容，此时应用等值集中参数定理的等值图

如图 1-10 所示, 由这些等值电路可以求得传输线 Z_2 上的电压分别为

$$u_2 = \alpha U_0 (1 - e^{-\frac{t}{T_L}}) \quad (1-31)$$

式中: α 为折射系数, 其值等于 $\frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$; T_L 为时间常数, 其值等于 $\frac{L}{Z_1 + Z_2}$ 。

$$u_2 = \alpha U_0 (1 - e^{-\frac{t}{T_C}}) \quad (1-32)$$

式中: α 为折射系数; T_C 为时间常数, 其值等于 $\frac{CZ_1Z_2}{Z_1 + Z_2}$ 。

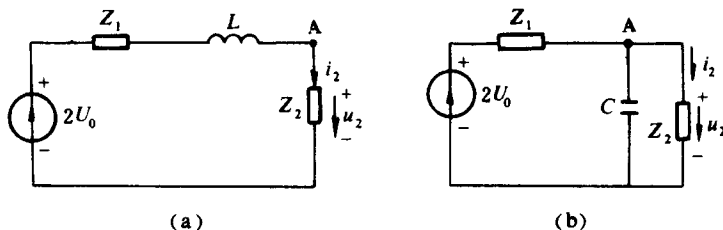


图 1-10 图 1-9 电路对应的等值电路图

(a) 串有电感; (b) 并有电容

它们相应的折反射波如图 1-11 所示。很显然, 传输线中串有电感时, 当电压波作用到电感时的瞬间, 电感不允许电流发生突变, 电感像开路一样将电压波完全反射回去, 因此折射的电压为零。随着时间的增长电流从零逐渐增大, 反射波电压逐渐减小, 折射波电压逐渐升高。因此, 传输线中间串有电感可以使来波的波头陡度降低。

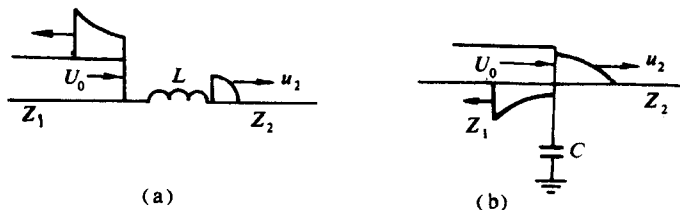


图 1-11 电压波通过电感和旁路电容时的折反射

(a) 串有电感; (b) 并有电容

当线路并有电容并且来波到达电容时, 电容上的电压不能发生突变, 此时电容就像短路一样, 从而使得 u_2 为零。随着时间的增长, 电容上的电压逐渐升高, u_2 也逐渐升高。由此可见, 传输线中并有集中电容时也会使来波的波头陡度减缓。

五、波的多次折反射与网格法

在许多实际情况中, 波在传输线的两端发生反射时, 而且在一个接点的折(反)射波会在另一接点发生折(反)射, 所以在某一接点的电压应是所有在该接点的折反射波的合成, 通常用网格法来进行计算。下面我们以计算波阻各不相同的 3 种导线互相串联时接点上的电压为例, 来介绍网格法的具体应用。

为叙述方便起见, 我们先写出波由线路 1 向中间线路传播时的折射系数 α_1 , 波由中间线路向线路 1 传播时的反射系数 β_1 以及波由中间线路向线路 2 传播时的折反射系数 α_2 、 β_2 , 为简单起见设线路 1 及 2 的另一端均为无限长, 则有下列关系

$$\alpha_1 = \frac{2Z_0}{Z_1 + Z_0}; \quad \beta_1 = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}$$

$$\alpha_2 = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_0}; \beta_2 = \frac{Z_2 - Z_0}{Z_2 + Z_0}$$

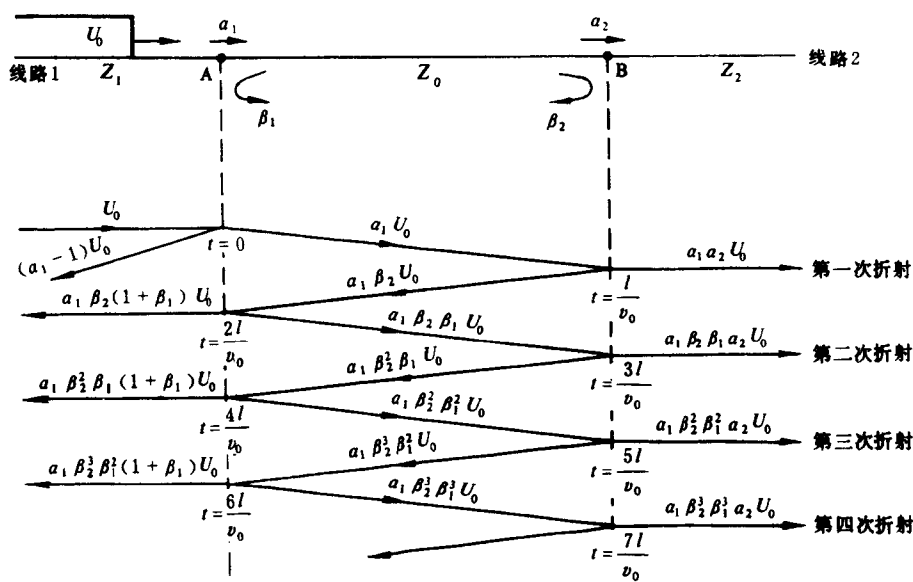


图 1-12 计算多次折、反射的网格图

入射波为无穷长直角波, n 次折反射后, B 点的电压是 n 个折反射波之和, 即

$$U_B = \alpha_1 \alpha_2 U_0 [1 + \beta_1 \beta_2 + (\beta_1 \beta_2)^2 + \dots + (\beta_1 \beta_2)^{n-1}]$$

$$= U_0 \alpha_1 \alpha_2 \frac{1 - (\beta_1 \beta_2)^n}{1 - \beta_1 \beta_2}$$

当 $t \rightarrow \infty$ 即 $n \rightarrow \infty$ 时, 接点 B 上的电压将为

$$U_B = U_0 \alpha_1 \alpha_2 \frac{1}{1 - \beta_1 \beta_2}$$

六、变压器绕组的波过程

当冲击波侵入绕组时, 变压器中会出现复杂的电磁波过程, 这将在主、纵绝缘的元件上引起快速变化的过电压, 由于绕组分布的纵向电容和横向电容、线匝和绕组的自电感和互电感的相互影响, 准确地计算这些过程实际上是不可能的。因此下面我们采用一种能说明基本规律, 并能对绕组和绝缘的合理设计指出方向的简化计算方法。

单相变压器绕组等值电路如图 1-13 所示, 绕组长度方向上元件纵向电容的电荷为

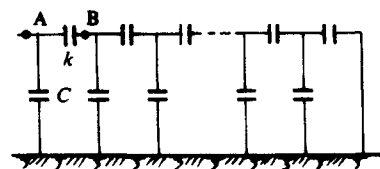


图 1-13 单相变压器绕组等值电路

$$q = \frac{k_0}{dx} du = k_0 \frac{du}{dx} \quad (1-33)$$

这个电荷的变化为

$$dq = u C_0 dx$$

对式 (1-33) 求导并作简单的变换后可得到微分方程

$$\frac{d^2 u}{dx^2} - \frac{C_0}{k_0} u = 0 \quad (1-34)$$

该方程的解为

$$u = A_1 e^{\alpha x} + A_2 e^{-\alpha x} \quad (1-35)$$

其中 $\alpha = \sqrt{\frac{C_0}{k_0}}$, 积分常数取决于边界条件。当变压器中性点接地即 $x = l$ 处 $u = 0$ 时, 可得到

$$u = U_0 \frac{e^{\alpha(l-x)} - e^{-\alpha(l-x)}}{e^{\alpha l} - e^{-\alpha l}} = U_0 \frac{\operatorname{sh} \alpha(l-x)}{\operatorname{sh} \alpha l} \quad (1-36)$$

当中性点绝缘即 $x = l$ 处 $\frac{du}{dx} = 0$ 时, 可得到

$$u = U_0 \frac{e^{\alpha(l-x)} + e^{-\alpha(l-x)}}{e^{\alpha l} + e^{-\alpha l}} = U_0 \frac{\operatorname{ch} \alpha(l-x)}{\operatorname{ch} \alpha l} \quad (1-37)$$

对于当今的变压器, $\alpha \approx 5 \sim 30$, 所以 $e^{\alpha l} \gg e^{-\alpha l}$, 对于大部分绕组 $\left(\frac{x}{l} < 0.8\right)$, $e^{\alpha(l-x)} \gg e^{-\alpha(l-x)}$ 。在这种条件下, 中性点绝缘或接地时, 绕组在起始时刻的电压分布实际上是一样的

$$u(x) = U_0 e^{-\alpha x} \quad (1-38)$$

图 1-14 为电压在变压器绕组上的分布曲线, 其中最上面的曲线为最大电位包线, 即绕组

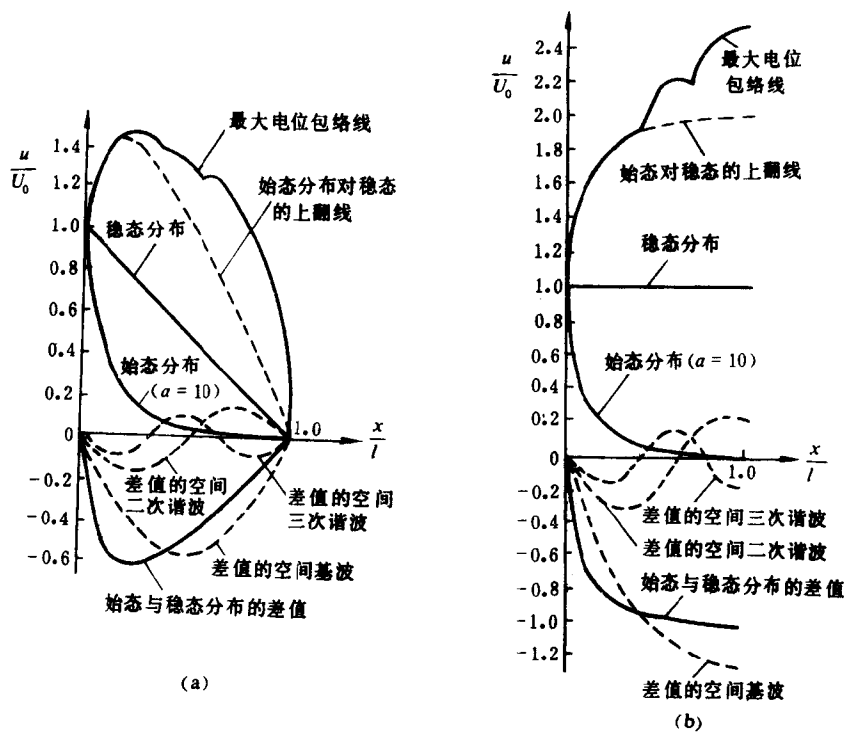


图 1-14 方波侵入后电压在绕组上的始态、稳态分布及最大包络线

(a) 变压器中性点接地; (b) 变压器中性点绝缘

每一点可能出现的最大电位。由图 1-14 可见, 中性点绝缘时的最大电压出现在绕组末端, 所以不接地的半绝缘变压器中性点应采取适当的保护措施。从图 1-14 还可以看出, 波入侵后的初始时刻, 纵绝缘上的最大电压出现在绕组首端的线匝上, 理论上最大梯度是绕组电压均匀

分布时的场强的 al 倍, 因此必须采取措施使之接近绕组的起始电位分布。通常采用的措施有电容环、静电线匝及改变绕组的绕法。

七、铁磁谐振的基本原理

和线性谐振不同, 非线性谐振是由于铁芯饱和, 电感减小使回路性质发生变化而引起的, 铁磁谐振时串联支路中的电容不像线性谐振那样要有严格的 C 值, 变化范围很大。发生谐振后, 电路从感性变成了容性, 因此电流的相位将有 180° 的转变, 由此引起电感及电容上的电压反相 (即所谓电压反倾)。下面我们对图 1-15 (a) 所示的电路作一初步的分析。

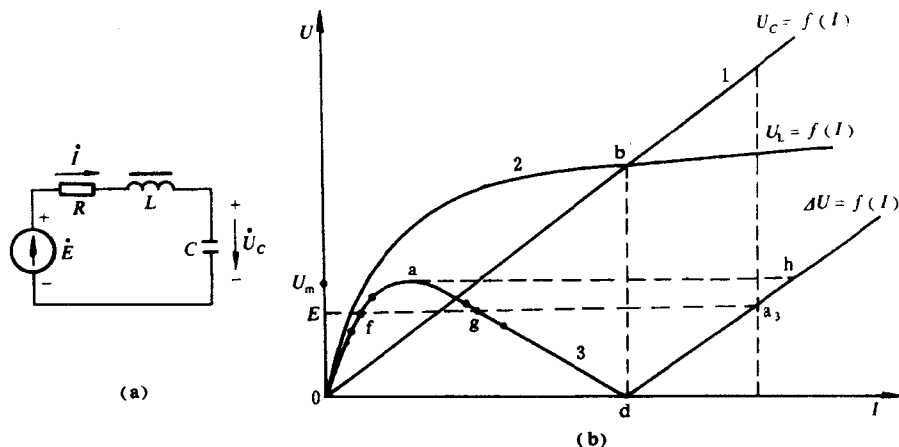


图 1-15 铁磁谐振原理图

(a) 电路接线图; (b) 曲线图

1—电容伏安特性; 2—非线性电感伏安特性; 3—电容电感串联伏安特性

图 1-15 (b) 中曲线 1 为电容的伏安特性; 曲线 2 为非线性电感的伏安特性。考虑到电容和电感上电压的相位关系可得曲线 1 和曲线 2 的和 (即曲线 3), 在曲线 3 上, $0ad$ 段对应的是感性部分, dh 对应的是容性部分。当电源电压大于 U_a 时, 那么串联回路始终工作于谐振状态; 当电源电压小于 U_a 时, 则正常情况下回路应工作在 f 点, 整个回路呈感性。这时若由于某种扰动, 将使工作点越过 a 点并趋向于 g 点, 但由于 g 点是不稳定的工作点, 任何扰动又将使工作点偏向 $g-d$ 段, 出现电流增加, 从而工作点迅速地又从 g 点转移到 h 点, 并稳定于该点。此时电容 C 上的电压高于电感 L 上的电压, 电路又呈现容性。

从图 1-15 中可以得到铁磁谐振的几个性质如下。

(1) 产生铁磁谐振的条件是 $\omega L > \frac{1}{\omega C}$ (或 $C > \frac{1}{\omega^2 L}$)。若不满足此条件, 电容 C 的伏安特性与电感的伏安特性无交点, 电路始终呈容性, 也就不可能产生谐振。

(2) 当电源电压大于或等于 U_a 时, 谐振总是发生。当电源电压小于 U_a 时, 必须要有某种“激发”因素使得工作点越过 a 点后, 才有可能产生谐振。

(3) 当 $\omega C \gg \frac{1}{\omega L}$ 时, 曲线 1 变得平坦了, U_a 也就增大了, 所需的激发因素也就越强了。当 C 值太大时, 将使出现铁磁谐振的可能性减小。

(4) 当铁磁谐振时, L 和 C 上的电压都不会像线性谐振时那样趋于无限大, U_L 的大小显然由曲线的饱和程度决定。而 U_C 则等于 U_L 与电源电压之和, 因此铁磁谐振过电压幅值一般

不会很高。

(5) 铁磁谐振产生后, 工作点是一个稳定工作点, 因此谐振状态可能自保持。

(6) 由于非线性电感 L 的存在, 铁磁谐振的电流波形中除了工频分量外, 还会有高次谐波分量, 有时甚至有分次谐波分量, 到底出现哪种谐振和电路的固有频率有关。

(7) 产生铁磁谐振后, 容抗已大于感抗, 回路从感性变成容性, 基波电流反相, 这种现象出现在三相电路中可能使工频三相的相序改变。

第二节 雷电过电压

一、雷电的电气参数和雷电活动强度

雷电是发生在空气间隙中的一种火花放电, 其电压可高达数百万到数千万伏, 其电流可高达数千万安, 被雷击中后, 人畜死伤, 建筑物炸毁或燃烧, 线路停电以及电气设备损坏, 都是常有的雷害事故。

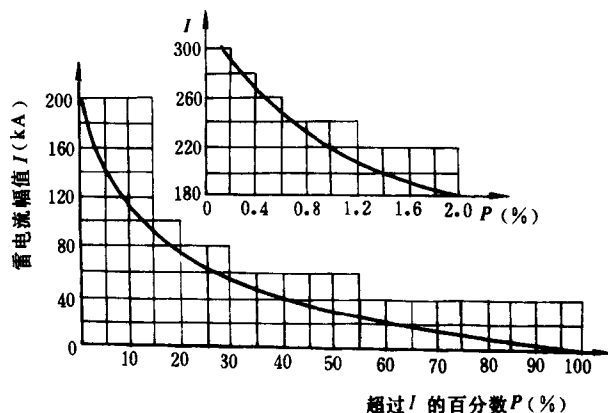


图 1-16 雷电流幅值的概率曲线

在计算电气设备的防雷性能时, 主要的原始数据通常不是电压而是电流。因为只有雷电流才能直接测量。

雷电流的幅值与雷云中电荷多少有关, 显然是个随机变量。它又与雷电活动的频繁程度有关。我们采用雷日为单位, 在一天内只要听到雷声就算一个雷日。我国在年平均雷日大于 20 日的地区测过 1205 个雷电流, 其幅值概率曲线如图 1-16 所示。该曲线也可以用下式表示

$$i_g p = -\frac{1}{108} I$$

式中: p 为雷电流超过 I (单位为 kA) 的概率, 例如当 $I=100\text{kA}$ 时, 可求得 $p=11.9\%$, 即每 100 次雷电流大约平均有 12 次雷电流幅值超过 100kA。对于年平均雷日在 20 及以下的地区, 即除陕南以外的西北地区及内蒙古自治区的部分地区, 雷电流的概率可按图 1-16 曲线给定的 p 值查出 I 后, 将 I 减半求得; 也可用下式表示

$$i_g p = -\frac{1}{54} I \quad (1-39)$$

对于雷电流的波形, 各国的测量波形是基本一致的, 波长大致在 $40\mu\text{s}$ 左右, 波头 τ_i 大致在 $1\sim 4\mu\text{s}$, 平均在 $2.6\mu\text{s}$ 左右。我国在防雷设计中采用 $2.6/40\mu\text{s}$ 的波形, 电气设备冲击电压试验的波形则取 $1.2/50\mu\text{s}$ 。

二、直击雷过电压及其防护

落雷时, 在波直接击中的导线上会有过电压形成。本条款中我们将讨论雷击无穷长导线时的直击雷过电压及雷击于另一端接地的有限长导线时的直击雷过电压。

当雷击于无限长导线的 A 点时, 等于沿主放电通道 (其波阻 $Z_0=300\sim 500\Omega$) 袭来一个

$\frac{i}{2}$ 的电流波。此时雷电流波碰到的是两侧导线的波阻相并联 $\left(\frac{Z}{2}\right)$, 由于 $Z_0 \approx \frac{Z}{2}$, 所以可近似认为此时在 A 点没有折反射发生, 于是 A 点直击雷过电压为

$$u_A = \frac{i}{2} \cdot \frac{Z}{2} = \frac{iZ}{4}$$

式中 Z ——导线波阻抗, 典型值为 500Ω 。

当雷击于另一端接地的有限长导线时, 为计算 A 点电位, 可用流动波的多次反射法进行计算, 但分析表明, 当接地导线长度小于 260m 时, 该段导线可以用等值电感来代替。若取入射波为斜角波, $i = \frac{\alpha}{2}t, R \approx 0$ 。其中, α 为陡度, 单位为 A/s 。

便可求得

$$u_{A\max} = \frac{\alpha}{2} Z \cdot \frac{2l}{v} = \alpha L_0 l = \alpha L$$

式中: v 为光速等于 $300\text{m}/\mu\text{s}$; l 为导线长度 (m); L 为被击导线的总电感。

取雷电流幅值为 100kA , 波头时间为 $2.6\mu\text{s}$, 那么可算得雷击于无穷长导线上的雷电过电压为

$$u_A = \frac{100}{4} \times 500 = 12500(\text{kV})$$

这一过电压相当高。

雷击于另一端接地的 10m 导线, 考虑接地电阻为 10Ω , 则雷击点的最大电压为

$$u_{A\max} = 10 \times 100 + \frac{1}{2} \times \frac{100}{2.6} \times 500 \times \frac{2 \times 10}{300} = 1641(\text{kV})$$

这样高的电压也足以对处于“零”电位导线产生反击。

防直击雷最常用的措施是装设避雷针(线)。它是由金属制成, 比被保护设备高, 具有良好的接地装置。其作用是将雷吸引到自己身上并安全地导入地中, 从而保护了附近比它矮的设备和建筑免受雷击。

单支避雷针的保护范围见图 1-17, 它是一个旋转圆锥体。

如用公式表示它的保护范围, 则在被保护物高度 h_x 的水平面上, 其保护半径 r_x 为

$$h_x \geq \frac{h}{2} \text{ 时 } r_x = (h - h_x)p \quad (1-40)$$

$$h_x < \frac{h}{2} \text{ 时 } r_x = (1.5h - 2h_x)p \quad (1-41)$$

式中: h 为针的高度, 当 $h \leq 30\text{m}$ 时, $p=1$; 当 $30\text{m} < h \leq 120\text{m}$ 时, $p = \frac{5.5}{\sqrt{h}}$ 。其中 p 的取值已考虑了针太高而保护半径不与针高成正比增大的系数。

用避雷线保护变电所时单根避雷线的保护范围见图 1-18, 用公式表达为

$$h_x \geq \frac{h}{2} \text{ 时 } r_x = 0.47(h - h_x)p \quad (1-42)$$

$$h_x < \frac{h}{2} \text{ 时 } r_x = (h - 1.53h_x)p \quad (1-43)$$

式中: p 的取值同单根避雷针。

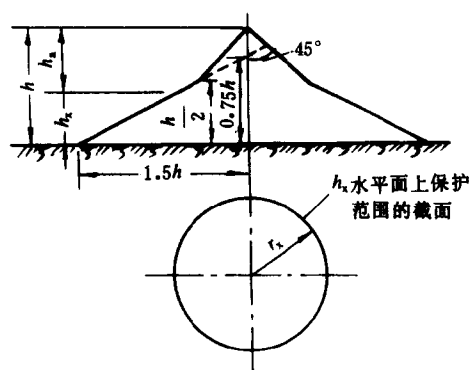


图 1-17 单支避雷针的保护范围
 h —避雷针的高度; h_x —被保护物的高度;
 h_a —避雷针的有效高度; $h_a = h - h_x$;
 r_x —在 h_x 的高度上保护范围的半径