

116

TM 86
C44

电力调度技术丛书

过电压保护原理 与运行技术

陈慈萱 编



A0968470



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书阐述了各种内部过电压和雷电过电压的成因。对不对称短路引起的工频过电压、切合空线过电压、消弧线圈的线性谐振、断线铁磁谐振以及电压互感器饱和过电压作了较详细的分析。介绍了避雷针、避雷线、避雷器、半导体消雷器等防雷装置以及架空线和变电站的防雷。拓宽了配电网防雷的内容,并结合微波站防雷对电子设备的防雷作了具体分析。

本书系调度技术丛书之一,可作为电力系统各级调度部门的培训教材,也可供其他从事过电压及防雷工作的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

过电压保护原理与运行技术/陈慈萱编. - 北京:中国电力出版社, 2001

ISBN 7-5083-0629-5

I. 过… II. 陈… III. 过电压保护 - 基本知识 IV. TM86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 25876 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>)

利森达印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2002 年 6 月第一版 2002 年 6 月北京第一次印刷

850 毫米 × 1168 毫米 32 开本 4.875 印张 125 千字

印数 0001—4000 册 定价 10.00 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)

全国电力调度技术 丛书编委会

主 任：赵遵廉

副主任：王益民 辛跃中 陈允平

委 员：陈慈萱 张志刚 洪 军 卢 放

胡江溢 房 喜 江际峰 张建平

程慈源 何源森 谈顺涛 刘克兴

吴复立 倪以信

主 编：陈允平

序 言

电力工业作为国民经济的基础产业，其影响之大是众所周知的事实，无论是对工业、农业、商业或是对于广大人民的生活都是如此。对一个现代国家来说，没有电力是不可思议的事。美国、法国、日本等国家由于大面积停电事故造成的混乱不堪的局面就是电力工业重要作用的反面证明。因此，规划好、建设好、运行好现代电力系统是每一个电力工作者责无旁贷的天职。

改革开放以来，电力工业进行了一系列的管理体制改革，而且随着电力市场的发展，还将进行更深刻的变革，为电力工业注入更大活力，给电力工业的进一步发展带来新的挑战，新的契机，这是电力工作者面临的新形势新任务。在新的世纪里，电网管理如何迈上新台阶，在市场经济的大潮中当好国民经济的先行，无疑是一项十分紧迫的任务。

三峡电网的建设，东北华北电网已联网、西南和南方电网已联网，形成全国统一电网已不是遥远的未来；电力电子技术大量进入电力系统，也蕴酿着电力系统在技术上的变革；全国性电网是一个地域分布十分广阔、运行工况十分复杂的大系统，这样一个大系统无论是分析、规划还是运行都有许多亟待研究解决的新问题。预见、正视、解决电力工业中不断提出的新问题。大大提高电力系统的整体水平，是“科学技术是第一生产力”的具体体现。

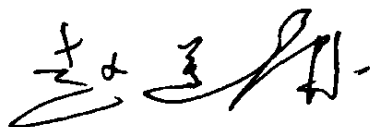
随着计算机技术、计算技术、通信技术、自动控制技术的日新月异的发展，电力系统作为对新技术十分敏感的行业新技术、新方法层出不穷，给人以目不暇接的感觉。学习、应用、发展新技术、新方法、新理论是电力工业者的又一十分紧迫的任务。

调度从来是电力生产的第一线，直接控制指挥整个电网的运

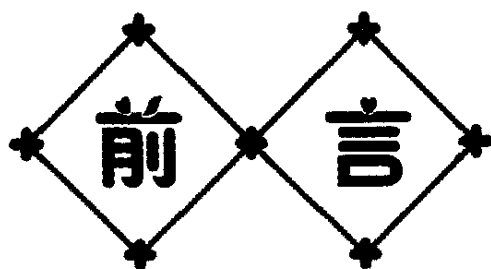
营，对电力安全、经济运行起着至关重要的作用，直接关系到各行各业用电的可靠性、连续性和电能质量，关系到电网的经济效益和社会效益。调度工作的重要性和特殊性决定了对调度人员，尤其是调度系统的领导，在政治觉悟、技术素质、工作能力、职业道德诸多方面都有很高的要求。为了适应这种形势，满足电网发展对调度人员的要求，国家电力调度中心在国家电力公司领导的直接关怀下，委托武汉大学电气工程学院举办了多期网省局调度局长，总工学习班，聘请了一批学有专长专家讲课，对他们进行管理和技术的培训。在培训班中既有基本理论的讲授，作到温故而知新；又有新技术、新方法的培训，跟踪调度技术发展的前沿。收到了良好效果。这种班我们还将不断更新教学内容，持续办下去，使我们的调度人员的知识不断更新，充分发挥科学技术的力量，不断提高调度水平，适应电力工业不断发展的新形势。

总结多期网省局调度局长总工学习班的经验，为了提高调度人员的管理水平和技术水平，组织有关专家学者编写了《电力调度技术丛书》，第一辑计五种，以后还将根据需要出版后续的各种。我相信，这套调度技术丛书的出版对于提高电力系统调度队伍的水平 and 人员素质将起到有力的推动作用。十分感谢作者们的辛勤劳动，祝贺本套丛书的出版，欣然为序。

国家电力调度中心



2002.4.25



电力系统的工作可靠性是与其绝缘水平和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运行维护的工作量。

过电压可以分为内部过电压和雷电（外部）过电压两大类。

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关合某一线路或设备，以及电力系统发生了故障（断线或绝缘击穿等）。内部过电压的幅值和电力系统的运行密切相关，所以通常用电力系统最高运行相电压 U_p （幅值）的倍数 K 来表示。最高运行相电压可能比额定相电压高出 15%（对 220kV 及以下的系统而言）或 10%（对 330kV 及以上的系统而言）。内部过电压的范围通常为 $(2.2 \sim 4) U_p$ ，其大小和设备的性能（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）应能耐受大部分的内部过电压。因此，降低内部过电压不仅可以减少设备的事故次数，而且可以降低设备及线路的造价。后者在超高压系统中有更重大的经济意义。

雷电过电压是由雷云放电引起的，它可以分为直击雷过电压、感应雷过电压和流动波过电压。雷电放电的电压可达几万到

上十万千伏，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用避雷针和避雷线对设备和线路进行保护。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，由于静电感应和电磁感应而在设备或线路上形成的过电压，其幅值可达 300 ~ 400kV，会使得 35kV 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雷或感应雷时，电磁波沿着导线以光速流向发电厂、变电所，而在发电厂、变电所中出现的过电压，通常需用避雷器或间隙来加以限制，以保证发电厂、变电所的绝缘不受危害。

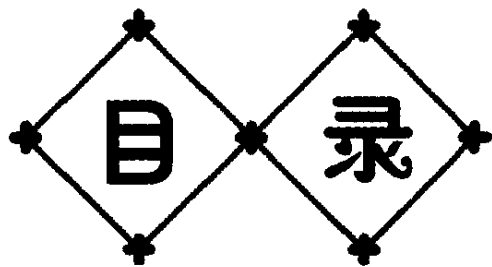
20 世纪 80 年代以来，随着电子技术的发展，电力系统普遍采用了微波通信和调度自动化系统，电子设备的防雷已越来越引起重视。由于大规模集成电路的应用，电子设备的供电电压已由十几伏降到几伏，传送的信息电流已由毫安级降到微安级，其对于干扰脉冲的承受能力已大大降低，必须采取更有效的防护措施。

本书是为国家电力调度局举办的全国电网和省的电力调度局长培训班编写的。书中在介绍常见的内部过电压、常规防雷装置以及线路和变电站防雷等内容外，加强了低压配电网防雷的内容，结合微波站防雷对电子设备的防雷作了具体分析，并介绍了电子设备的防雷元件以及新型防直击雷装置——半导体消雷器。本书可以作为各级调度部门的培训教材，也可供其他从事过电压及防雷工作的技术人员参考。

编者力图通过物理概念对各种过电压产生的机理及其保护方法作通俗的阐述并给出工程实用的结论，由于编者水平有限，错误和不妥之处，希望读者批评指正。

编 者

2002 年 6 月



前言

第一章 内部过电压 1

第一节	工频电压升高（工频过电压）	2
第二节	操作过电压的成因及其特点	15
第三节	谐振过电压的成因及其特点	32
第四节	消弧线圈补偿网络的线性谐振	46
第五节	断线谐振过电压	52
第六节	电压互感器饱和过电压	57
第七节	超高压电网中内部过电压的特点	65

第二章 雷电过电压 70

第一节	雷电过电压的成因及其特点	71
第二节	防雷保护装置	87
第三节	架空线路防雷	118
第四节	变电站防雷	123
第五节	低压配电网的防雷	131
第六节	电子设备的防雷	136

参考文献 145

内部过电压

由于电网中能量的转化或传递所产生的电网电压升高，叫做电网的内部过电压，简称内过电压。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磁耦合。电网内的操作（拉闸或合闸）和故障（断线或接地）都是激发能量转化的原因。因操作或故障引起的暂态电压升高，称为操作过电压，常见的有电弧接地过电压、空载变压器分闸过电压、空载线路分闸过电压、空载线路合闸过电压、解列过电压等。因系统的电感、电容参数配合不当，出现的各种持续时间很长的谐振现象及其电压升高，称为谐振过电压。常见的有线性谐振过电压、铁磁谐振过电压、参数谐振过电压等。

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最高运行相电压的幅值之比，叫内过电压倍数 K ，并以 K 来表示内过电压的大小。 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，它具有统计性质。通常在中性点直接接地的电网中，如果不采取限压措施，操作过电压的最大幅值可达最高运行相电压幅值的 3 倍以上；在中性点非直接接地的电网中，最大操作过电压可达最高运行相电压的 4 倍以上；谐振过电压的幅值则在 2 倍以上。

此外，电力系统中在正常或故障时还可能出现幅值超过最大工作相电压、频率为工频或接近工频的电压升高。这种电压升高统称为工频电压升高，或称为工频过电压。发电机突然甩负荷，空载长线的电感 - 电容效应和电网单相接地是使工频电压升高的

主要原因。工频过电压显然会影响到各种内过电压的数值，因为后者的倍数是以工频电压为基准的。工频过电压一般不应超过最高运行相电压的 1.3 倍（线路断路器的变电站侧）或 1.4 倍（线路断路器的线路侧）。

应该指出，操作过电压存在的时间远比谐振过电压和工频过电压存在的时间短，是暂态性质的；而对谐振过电压和工频过电压来说，如不采取措施是可以长期存在的，是稳态性质的。在实际运行中为确保电网的安全运行要采取措施避免谐振过电压和工频过电压的长期存在，即只允许其暂时存在，因此人们又把这两种过电压列入暂时过电压的类别。据此可把内部过电压分为暂态性质的操作过电压和稳态性质的暂时过电压两大类。下面分别进行介绍。

第一节 工频电压升高（工频过电压）

工频电压升高对系统中正常绝缘的电气设备一般是不会有危险的，但在确定超高压远距离输电系统绝缘水平时，却起着重要的作用，必须予以充分重视。因为工频电压升高的大小除直接影响操作过电压的幅值外，还将影响保护电器的工作条件和保护效果。例如避雷器最大允许工作电压是由工频电压升高决定的，如要求增高避雷器最大允许工作电压，则其冲击放电电压和残压也将提高，相应地，被保护设备的绝缘强度亦应随之提高。再如，对断路器并联电阻而言，工频电压升高将使断路器操作时流过并联电阻的电流增大，并联电阻要求的热容量亦随之增大，造成并联电阻制作的困难。而且工频电压升高持续时间长，对设备绝缘及其运行性能都有重大影响。例如，能使油纸绝缘内部发生游离、污秽绝缘发生闪络、铁芯过热、电晕及其干扰加剧等。

一、空载长线路中的电容效应

输电线路具有分布参数，但在距离较短的情况下，工程上可用集中参数的电感 L 和电容 C 来代替。由于空载线路的工频容

抗 X_C 大于工频感抗 X_L ，因此在电源电动势 $\dot{E}$ 的作用下，线路中的电容电流在感抗上的压降 $\dot{U}_L$ 将使容抗上的电压 $\dot{U}_C$ 高于电源电动势。根据图 1-1 的矢量图，有 $\dot{E}$

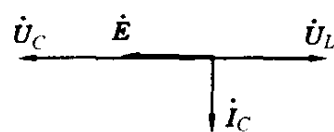


图 1-1 电容效应

$= \dot{U}_L + \dot{U}_C$ 或 $|U_C| = |E| + |U_L|$ ，即空载输电线路上的电压高于电源电压。这就是空载线路的电感 - 电容效应（简称电容效应）所引起的工频电压升高。

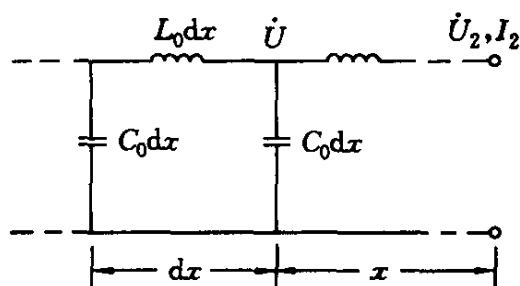


图 1-2 长输电线路等值链形电路

超高压、长距离输电线路，一般需要考虑它的分布参数特性。图 1-2 是均匀、对称、无损三相输电线路中的一相，图中 L_0 和 C_0 分别为线路单位长度的电感和电容。设 x 为线路上任意点距线路末端的距离，则线路

末端电压 $\dot{U}_2$ 和电流 $\dot{I}_2$ 为已知时，可写出线路上任意点的电压 $\dot{U}_x$ 和电流 $\dot{I}_x$ 的方程式为

$$\dot{U}_x = \dot{U}_2 \cos \alpha x + j \dot{I}_2 Z_c \sin \alpha x \quad (1-1)$$

$$\dot{I}_x = j \frac{\dot{U}_2}{Z_c} \sin \alpha x + \dot{I}_2 \cos \alpha x \quad (1-2)$$

其中

$$Z_0 = \sqrt{L_0 / C_0}, \quad \alpha = \omega \sqrt{L_0 C_0}$$

采用矩阵形式，式 (1-1) 和 (1-2) 可表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_x \\ \dot{I}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha x & j Z_0 \sin \alpha x \\ j \frac{\sin \alpha x}{Z_c} & \cos \alpha x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

设线路长度为 l ，即可得线路首端电压 U_1 和电流 I_1 的表达式为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha l & j Z_c \sin \alpha l \\ j \frac{\sin \alpha l}{Z_c} & \cos \alpha l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (1-4)$$

由式 (1-4) 可得, 空载长线末端开路, 即 $\dot{I}_2 = 0$ 时, 线路首端电压和末端电压的关系为

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cos al \quad (1-5)$$

或

$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{1}{\cos al} = \epsilon_{12} \quad (1-6)$$

式中 ϵ_{12} 为线路末端的电压传递系数。

已知波速 $v = 1/\sqrt{L_0 C_0} = 300\text{m}/\mu\text{s}$, $\omega = 314$, 取 l 单位为 km, 则可得

$$\begin{aligned} al &= \omega \sqrt{L_0 C_0} l = \frac{\omega}{v} l \\ &= \frac{314}{300 \times 10^6} \times l \times 10^3 \\ &= 1.046 \times 10^{-3} l (\text{rad}) \\ &= 0.06 l^\circ \end{aligned}$$

表 1-1 列出了按式 (1-6) 计算所得的末端电压与首端电压的比值 U_2/U_1 对线路长度的关系。从表中可见, 当线路长度为 300km 时, 末端电压不过上升 5%; 当线路长度为 400km 时上升不到 10%。在线路长度达到 1500km, 即为工频波长的 1/4 时, 末端电压将上升为无穷大, 此时系统处于谐振状态。

表 1-1 U_2/U_1 对线路长度的关系

线路长度 (km)	100	200	300	400	600	1000	1500
al	6°	12°	18°	24°	36°	60°	90°
空线末端电压与首端电压的比值 U_2/U_1	1.006	1.021	1.050	1.095	1.240	2.000	∞

同样由式 (1-3) 可得空载长线末端开路, 即 $I_2 = 0$ 时, 线路上任一点的电压为

$$\dot{U}_x = \dot{U}_2 \cos ax = \frac{\dot{U}_1}{\cos al} \cos ax \quad (1-7)$$

可见无损空载长线沿线电压按余弦规律分布, 如图 (1-3) 所示。因线路各段导线上电容电流不同, 沿线电压升高是不均匀的, 线路末端电压最高。线路上任一点电压 $\dot{U}_x$ 也可用电压传递系数 ϵ_{1x} 表示

$$\epsilon_{1x} = \frac{U_x}{U_1} = \frac{\cos \alpha x}{\cos \alpha l} \quad (1-8)$$

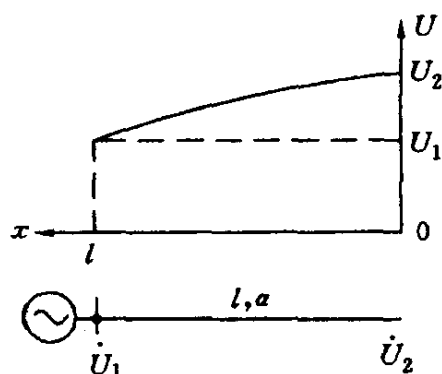


图 1-3 空载线路的电压分布

有时, 为了便于计算和分析, 需要

将线路用集中参数阻抗的电路来代替, 当长线末端开路时, 从首端向线路看去, 线路可等值为一个阻抗 Z_{RK} , 即末端开路时的首端入口阻抗。从式 (1-4) 可知

$$Z_{RK} = \frac{\dot{U}_{IK}}{\dot{I}_{IK}} = \frac{\cos \alpha l}{j \frac{\sin \alpha l}{Z_0}} = -j Z_0 \operatorname{ctg} \alpha l \quad (1-9)$$

当 $\alpha l < 90^\circ$ 时, Z_{RK} 为容抗。

将余切函数用级数展开^①, 取前两项作近似计算, 得

$$\begin{aligned} Z_{RK} &= -j Z_0 \cot \omega \sqrt{L_0 C_0} l \\ &\approx -j \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \left[\frac{1}{\omega \sqrt{L_0 C_0} l} - \frac{1}{3} \omega \sqrt{L_0 C_0} l \right] \end{aligned} \quad (1-10)$$

根据上式, 若取一次近似, 则长线等值电路可简化为图 1-4 (a), 若取二次近似, 则可简化为图 1-4 (b)。这在分析某些操作过电压时是有用的。

为了补偿长线的电容效应, 限制工频电压升高, 在较长的超高

① $\cot x = \frac{1}{x} - \frac{x}{3} - \frac{x^3}{45} - \frac{2x^5}{945} - \frac{x^7}{4725} - \dots - \frac{B_{2n-1} (2x)^{2n}}{x (2n)!} - \dots [x^2 < \pi^2];$

$\frac{B_{2n-1}}{2n!} = \frac{2}{(2^{2n} - 1) \pi^{2n}} \left[1 + \frac{1}{3^{2n}} + \frac{1}{5^{2n}} + \dots \right]$

压线路中一般都设置有并联电抗器^①，并联电抗器可以设置在线路的一端、两端、或者中部。下面以图 1-5 所示电抗器接在空载线路末端为例来进行分析。将线路和并联电抗器分别用无源二端口网络代替，如图 1-6 所示。写出并联电抗器的二端口网络表达式

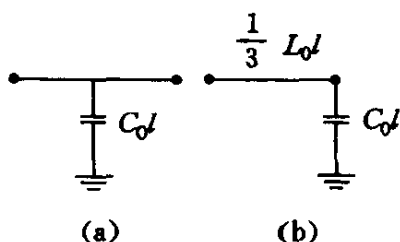


图 1-4 长线等值集中参数电路

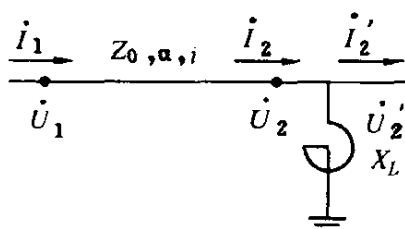


图 1-5 无损线路末端接有并联电抗器

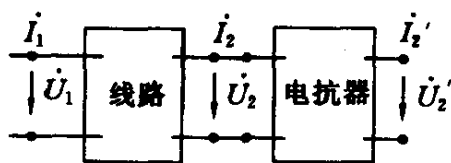


图 1-6 长线路的复合无源二端口网络

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{jX_L} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2' \\ \dot{I}_2' \end{bmatrix} \quad (1-11)$$

将式 (1-11) 代入式 (1-3) 所示的线路二端口网络表达式得

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{U}_x \\ \dot{I}_x \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \alpha x & jZ_0 \sin \alpha x \\ j \frac{\sin \alpha x}{Z_0} & \cos \alpha x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{jX_L} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2' \\ \dot{I}_2' \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \alpha x + \frac{Z_0}{X_L} \sin \alpha x & jZ_0 \sin \alpha x \\ j \left(\frac{\sin \alpha x}{Z_0} - \frac{\cos \alpha x}{X_L} \right) & \cos \alpha x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2' \\ \dot{I}_2' \end{bmatrix} \quad (1-12) \end{aligned}$$

因 $\dot{I}_2' = 0$, $\dot{U}_2' = \dot{U}_2$, 所以有

① 并联电抗器的作用不仅是限制工频电压升高，还涉及系统稳定、无功平衡、潜供电流、调相电压、自励磁及非全相状态下的谐振等方面，因而并联电抗器的容量及安装位置的选择需综合考虑。

$$\dot{U}_x = \left(\cos \alpha x + \frac{Z_0}{X_L} \sin \alpha x \right) \dot{U}_2 \quad (1-13)$$

$$\dot{U}_1 = \left(\cos \alpha l + \frac{Z_0}{X_L} \sin \alpha l \right) \dot{U}_2 \quad (1-14)$$

于是可得

$$\dot{U}_x = \frac{\cos \alpha x + \frac{Z_0}{X_L} \sin \alpha x}{\cos \alpha l + \frac{Z_0}{X_L} \sin \alpha l} \dot{U}_1 \quad (1-15)$$

取 $\operatorname{tg} \beta = \frac{Z_0}{X_L}$, 上式可化简为

$$U_x = \frac{\cos(\alpha x - \beta)}{\cos(\alpha l - \beta)} \dot{U}_1 \quad (1-16)$$

根据式(1-16)即可作出电压沿线路的分布曲线如图 1-7 所示。并可知当 $\alpha x - \beta = 0$ 时, 将出现最大电压 U_m , 即最大电压将出现在

离线路末端 $x = \frac{\beta}{\alpha}$ 处, 其值为

$$U_m = \frac{U_1}{\cos(\alpha l - \beta)} \quad (1-17)$$

与式 (1-5) 相比可知, 当线路末端有电抗器时, 线路上出现的最高电压将比无电抗器时要低。

显然, 并联电抗器调整电压的作用与电抗器的容量 Q_L 以及

所补偿长线电容的无功功率 Q_C 有关。 Q_L 和 Q_C 的比值称为补偿度, 用 T_K 表示, 可得

$$\begin{aligned} T_K &= \frac{Q_L}{Q_C} = \frac{U_n^2 / X_L}{U_n^2 \omega C_0 l} = \frac{1}{X_L \omega C_0 l} \\ &= \frac{\sqrt{L_0 / C_0}}{X_L} \frac{1}{\omega \sqrt{L_0 C_0} l} = \frac{Z_0}{X_L} \frac{1}{\alpha l} = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\alpha l} \end{aligned} \quad (1-18)$$

式中 U_n 为线路的额定电压。

以长度 400km 的 500kV 线路为例, 由表 1-1 查得

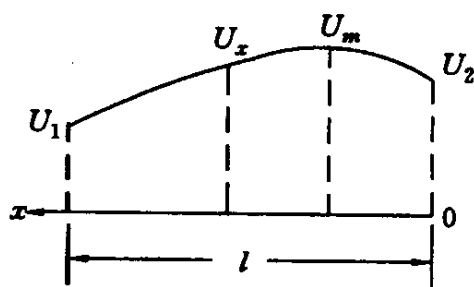


图 1-7 末端有并联电抗器时
线路的沿线电压分布

$$\alpha l = 24^\circ = 0.419(\text{rad})$$

$$U_2 = 1.095 U_1$$

通常 T_k 取 0.6 左右, 当 $T_k = 0.6$ 时有

$$\text{tg}\beta = 0.6 \times 0.419 = 0.2514$$

$$\beta = 14.1^\circ$$

由式 (1-17) 可得线路上的最大电压

$$U_m = 1.015 U_1$$

出现在线路末端 $x = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{14.1}{24} = 0.588$ (km) 处。

已知线路的额定电压 $U_n = 500\text{kV}$, $Z_0 = 260\Omega$, 则可求得电抗器的功率为

$$\begin{aligned} Q_L &= \frac{U_n^2}{X_L} = \frac{U_n^2}{Z_0} \text{tg}\beta = \frac{500^2}{260} \times 0.2514 \\ &= 241.7(\text{MVA}) \end{aligned}$$

应该指出, 以上分析尚未考虑电源阻抗 X_s 的存在, 即认为线路首端电压 U_1 即为电源电动势 E 。当计及电源阻抗 X_s 时, 线路电容电流流过电源阻抗所产生的压升, 将使线路首端电压 U_1 高于电源电动势 E 。此时长线的电容效应以及由之产生的工频过电压将更趋严重。

二、不对称短路引起的工频电压升高

不对称短路是输电线路中最常见的故障形式, 在单相或两相不对称接地短路时, 非故障相的电压一般说将会升高, 其中单相接地时非故障相的电压可达较高的数值。特殊情况下, 两相短路接地也会出现较大的工频电压升高, 但此种概率较小, 所以在此只讨论单相接地故障。

通常从朴素的概念出发, 可能认为在中性点不直接接地的电网中, 一相接地时健全相电压将上升为 $\sqrt{3} U_p$, 而在中性点直接接地的电网中, 一相接地时健全相电压仍保持为 U_p , 但上述结论只是在三相之间互相独立无联系时才是对的。实际电网三相之间既有电的

联系,又有磁的联系。搞得不恰当的话,在中性点不直接接地的电网中,一相接地时健全相电压可趋向无穷大;在中性点直接接地的电网中,一相接地时健全相电压也会比 U_p 上升许多。

我们来分析图 1-8 所示的在 K 处的单相接地故障。由于发电机、变压器和线路三相之间既有电的联系,又有磁的联系,所以用一般分析电路的方法来计算这种不对称短路,连列方程都会感到困难,必须采用对称分量方法,通过复合序网络进行分析。

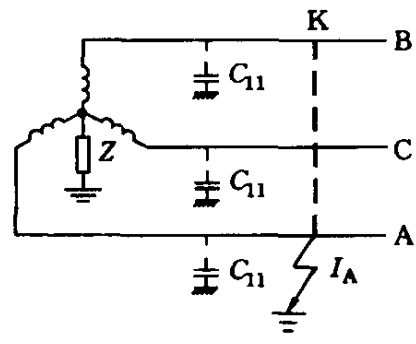


图 1-8 单相接地故障

根据故障点的 A 相电压 $\dot{U}_A = 0$, 非故障相的故障电流 $\dot{I}_B = 0$, $\dot{I}_C = 0$ 这一条件, 按对称分量关系可作出图 1-9 所示的复合序网络。

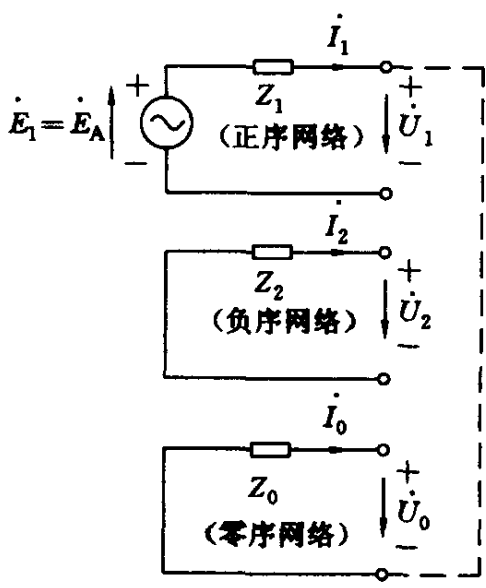


图 1-9 计算单相接地故障的复合序网络

其中, Z_1 、 Z_2 和 Z_0 分别为在图 1-8 的 K 处, 将故障点解开, 而在导线对地间分别加以正序、负序和零序电压, 同时令系统原有电动势全部为零 (全部电机励磁为零) 时测得的阻抗值; 而 $\dot{E}_1$ 为解开 K 处故障后在 K 处测得的正序电动势, 即正常运行时 K 处 A 相的相电压 $\dot{E}_A$; $\dot{U}_1$ 和 $\dot{I}_1$ 、 $\dot{U}_2$ 和 $\dot{I}_2$ 、 $\dot{U}_0$ 和 $\dot{I}_0$ 分别为故障点的正序、负序、零序电压和电流。

由图 1-9, 即可求出

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \dot{I}_0 = \frac{\dot{E}_A}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (1-19)$$