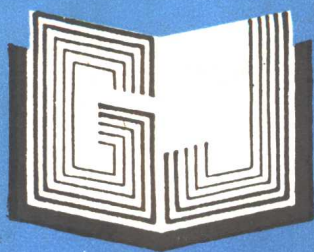


981069



高等学校教材



电力系统过电压分析与计算

贵州工学院 胡国根 编



高等学校教材

电力系统过电压分析与计算

贵州工学院 胡国根 编

水利电力出版社

(京)新登字 115 号

内 容 提 要

本书由电力系统过电压的分析与计算及计算电力系统过电压的计算机辅助设备两大部分组成。第一部分包括第一~第六章, 主要介绍输电线路的大气过电压和操作过电压的分析与计算、高压变电站的绝缘配合等。对 ZnO 无间隙避雷器和气体绝缘变电站 (GIS) 作了系统、全面的介绍是本书的一大特色。第二部分包括第七章, 主要介绍了电子模拟计算机、暂态网络分析、直流仿真器及数字电子计算机等计算过电压的辅助设备, 这是电力系统过电压的实验研究方法中的重要内容, 安排这部分内容, 使本书独具特色。

本书是电力系统及其自动化专业的选修课教材, 也是该专业硕士研究生教材, 还可作为高等学校教师、工程技术人员及研究人员的参考用书。

高等学校教材
电力系统过电压分析与计算
贵州工学院 胡国根 编

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

北京市朝阳区小红门印刷厂印刷

787×1092 毫米 16 开本 8 印张 177 千字

1995 年 5 月第一版 1995 年 5 月北京第一次印刷

印数 0001—1190 册

ISBN7-120-02130-3/TM·592

定价 4.70 元

前 言

《电力系统过电压分析与计算》是电力系统及自动化专业本科生的选修课教材，也可作为本专业研究生教材。本课程的前导课是《高电压技术》。

在研究电力系统过电压技术方面的有关教材之后发现，这些教材的系统性都比较好，叙述完整、严密，给人一种浑然一体的感受。另外，还有一种编写教材的方法，即在处理素材时尽可能揭示技术的发展过程，读过以后，既会在读者的心目中留下了一个系统的工程技术概念，又会使读者看到许多缝隙——即科学技术上尚待继续努力的许多问题，从而激发起读者的创造欲望和冲动，试图用自己的聪明才智也去解决一、两个具体问题，这种编写方法，比较适合于选修课与研究生课教材。本书在编写过程中试图做到这一点。

本书由唐兴祚教授主审，唐先生仔细审阅了书稿，并提出了宝贵的意见，谨致深切谢忱。

本书多处引用 W. Diesendorf 著的 Insulation Co-ordination In High Voltage Electric Power Systems 一书的材料，为避免重复，故未在参考书目中列出。

本书的出版还得到了浙江大学赵智大教授的帮助，谨致深切谢忱。在编写过程中得到贵州工学院明方成教授、胡筑怀工程师的大力支持，特此致谢。

由于编写时间短促，个人水平有限，错漏之处望不吝指正。

编 者

1994 年 7 月 27 日于贵州工学院

F 11/10/06

目 录

前 言	
绪 论	1
第一章 过电压	2
第一节 雷闪冲击波	2
第二节 工频电压升高	4
第三节 操作过电压	11
第二章 击穿放电与耐受电压	20
第一节 自恢复绝缘	20
第二节 非自恢复绝缘	30
第三章 输电线上的雷闪过电压	33
第一节 引言	33
第二节 输电线路上的感应过电压	34
第三节 绕击及绕击闪络率	35
第四节 雷击杆塔时的过电压	40
第五节 雷击架空地线时的过电压	44
第六节 确定线路绝缘上过电压的实用办法	44
第七节 雷电波的衰减和畸变	45
第四章 输电线路的防雷性能	49
第一节 引言	49
第二节 无屏蔽线路的闪络率	49
第三节 屏蔽线路的闪络率	50
第四节 跳闸率和停电率	56
第五章 输电线的操作过电压设计	57
第一节 概述	57
第二节 杆塔绝缘设计	59
第三节 特高电压下的应用	63
第六章 高压变电站的绝缘配合	64
第一节 原则	64
第二节 过电压保护装置	64
第三节 有保护区的变电站	74
第四节 无保护区的变电站	83
第五节 用电缆连接的设备	83
第六节 SF ₆ 气体绝缘变电站 (GIS)	84
第七章 计算电气暂态过程的计算机辅助设备	91
第一节 概述	91

第二节	电子模拟计算机	91
第三节	暂态网络分析仪	97
第四节	直流仿真器	101
第五节	数字计算机	101
第六节	暂态过程的统计处理——蒙特卡诺法	117
参考文献		119

绪 论

电力系统供电的可靠性是由在一定时间内（如一年）中断用户供电的次数和持续时间来判断的。可靠性在很大程度上取决于电力系统的冲击特性，因为虽然有许多原因可能导致供电的中断，但绝缘击穿却是最常见的。

如果系统绝缘只承受正常的运行电压，就不会有什么问题。因为正常运行电压只在很小的范围内变化（ $\pm 5\%$ ），但实际上绝缘却要承受各种过电压的袭击。各种过电压的波形、幅值和持续时间均不相同，变化范围很大，这些不同参数影响绝缘承受过电压的能力。因此，我们面临的问题是：

（1）查明各种过电压的幅值、波形、频率、持续时间以及当过电压从源点向某设备运动过程中这些参数所发生的变化；

（2）确定使用中的各种绝缘在这些过电压作用下的耐压特性，使绝缘强度与所受到的过电压相适应。

要使绝缘承受可能产生的最大过电压往往是不可能的。除技术方面的限制之外，更重要的是经济方面的制约。应该这样来选定绝缘承受过电压的极限：可靠性的提高会减少绝缘击穿的次数，前者要增大投资，后者则使运行费用减少。若运行费用的减少不能证明投资的增加是合算的时候，就不要再提高可靠性了。由经济决定的极限要比由技术决定的极限低得多。在设计电力系统时，要很慎重地选用一个击穿概率。在这一点上电力系统设计工程师的基本设计观点是有别于土建工程师的，土建工程师在设计某一结构时，要使它承受可以预计到的最大应力，以免由于结构的破坏而造成灾难性的后果。另一方面，电力系统的设计还要做到：当击穿不可避免地要发生时，应将它们限在那些可能造成破坏最小和对运行造成干扰最小的地方，比如应使绝缘闪络限制在线路绝缘上，而不要发生在变电所内。同时还要设法不使每一次绝缘击穿都导致线路的切断，例如采用消弧线圈或管型避雷器保护输电线路等。绝缘破坏后对供电的中断可以用以下办法减至最低限度：①采用快速、灵敏的保护装置，②采用双电源和自动重合闸装置。但这些技术均超过本课程的范围。

确定绝缘上的过电压是一项十分复杂的任务，人们已经作了许多理论研究，这方面的工作仍在继续进行。由于影响因素过多，因此实践中又发展了实验研究方法。两种方法各有优点，互相补充。主要的实验研究方法有现场试验、模型研究以及借助电子计算机的各种研究方法（电子模拟计算机法、TNA 和电子数字计算机法）。

本书将依照上述基本思路安排有关材料，择要介绍各种研究设备，这是一种尝试。

紧凑型交流输电线路的理论和实践正在兴起，这必然会促使各国的科技工作者更加深入研究过电压作用下空气绝缘的行为，相信不久将会有专门著作问世。

第一章 过 电 压

大气放电可以形成作用于电力系统的过电压，这种过电压称作雷闪过电压。当在电力系统中接入或切除电路元件、系统产生故障或清除故障时，会在电力系统内部发生过电压，称之为内部过电压。如果产生的过电压具有工频或谐波频率，且为持续的或衰减微弱的，则这种过电压称为短时过电压；如果产生的过电压持续的时间很短而且衰减很厉害，则称之为操作过电压。由于起因相同，短时过电压和操作过电压常常一同出现，故而它们的联合作用会影响绝缘设计。另一方面，雷闪与操作冲击波同时作用于绝缘的概率却很小，可以忽略不计。

作用于输电线路的雷闪冲击波幅值受线路设计的影响甚微，因此随着绝缘水平或系统电压的提高，输电线路的防雷性能便有所改善。操作冲击波的幅值则大致上与运行电压成正比，结果便存在这样一个系统电压值，超过此值绝缘设计的侧重点便由雷闪转向操作波，这一电压值约为 300kV。在超高电压范畴内，一直到 765kV，都必须同时考虑雷闪与操作两种过电压。对目前正在研究的特高电压，操作过电压虽然不是唯一的标准，但却是主要的，绝缘子污染将作为主要的设计因素之一。

下列事实突出地强调了操作冲击波的重要性：与雷闪冲击波不同，当电压超过大约 1MV 时，外绝缘和空气间隙的操作冲击强度不再与放电距离成正比地增大，出现所谓“饱和”现象。

第一节 雷 闪 冲 击 波

在雷雨过程中，由于空气流的相互作用，正负电荷互相分离，冰晶在云层上部，雨水则在云层下部。有许多科学家对这一过程进行过研究，形成了许多理论，研究工作仍在进行中。但我们只对下列事实感兴趣：云层的绝大部分带负电，而在其顶部则有一正电荷层，其高度通常为 9~12km，靠近正电荷层的底部有少量带正电的杂质。负电荷中心距地面大约 500~10000m。雷云的底部可能距地面只有 150m。雷云的电位估计最少有 100MV。

人眼看到的对地雷击似乎是一次单一的耀眼的放电，虽然有时也可能见到亮度的变化。但是用旋转镜头照相机拍下的照片或电视录相揭示出：大多数雷击是重复的，即在第一次雷击形成的放电通道中，会有多次放电尾随，放电之间的间隔大约为 0.5~500ms。

第一次雷击可分为先导放电与主放电两个阶段。先导放电起始于云层中，云中局部的电荷集中区使电位梯度达到空气的临界击穿值（在海平面上干燥的空气中，其值为 30kV/cm；在海拔更高的充满水滴的空气中，其值约为 10kV/cm）时，便开始了先导放电。先导由高度电离的核心组成，它总是处于放电的前端并被一个直径约 30m 的电晕套所包围，长度为 50m 左右。先导是分级向地面推进的，每一级之间要间歇若干微秒（ μs ），其平均传导速度约为 150km/s。譬如雷击中心距地面 3000m，则先导要花费 20ms 才能到达地面，开始

主放电阶段。重复放电时,先导不是分级而是连续发展的。

主放电的电流(即雷电流)大约从几千安到 260kA,主放电的速度大约为光速的 10%~50%。

从本世纪 20 年代末开始,人们进行了大量的现场调查研究,以期查明影响输电线路运行性能的雷闪特性,不幸的是,时至今日所得到的资料仍然是不完全的或不确定的。

雷电流的典型示波图如图 1-1 所示。由图可见,雷电流具有以下几个特点:①雷电流多为负极性,图上表示为向下凹的波头(前);②波前时间短,最长仅为 $10\mu\text{s}$;③波形中有一强电流部分,其持续时间约为几十微秒;④强电流之后便是一个弱电流的波尾,其持续时间可达几百毫秒,这一部分电流是导致高温损坏的原因,故称之为“热雷闪”。

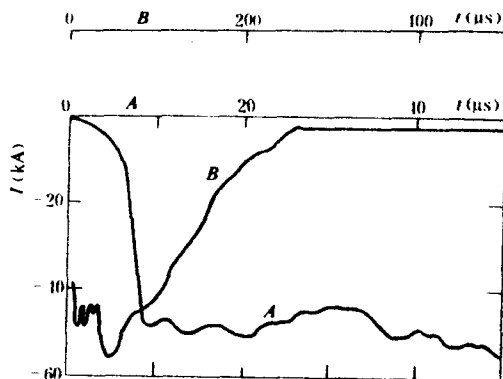


图 1-1 雷电流典型示波图

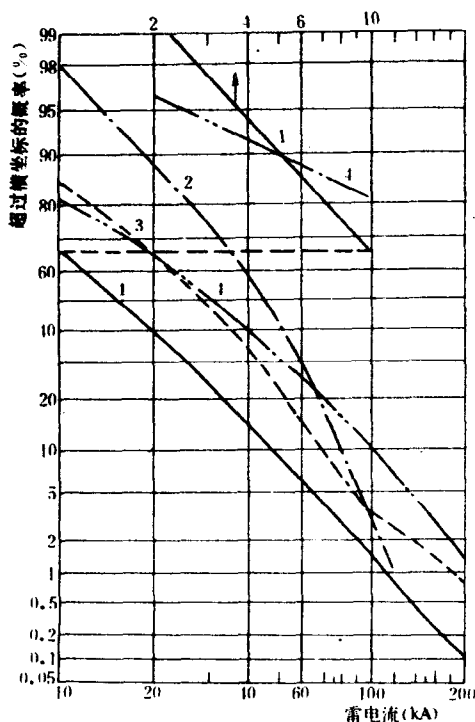


图 1-2 雷电流幅值的累积分布

1、2、3—不同研究者的成果;

4—规程推荐的曲线

雷电流幅值的概率分布曲线如图 1-2 所示。图中的曲线 1 是 AIEE 根据许多研究结果绘制的,它被广泛地用来进行防雷计算。曲线 2 是由安德逊 (Anderson) 提供的。比较曲线 1、2 可知,在 120kA 以下的各点,Anderson 统计的概率都高于 AIEE 的。曲线 3 是国际大电网会议 (CIGRE) 提供的,这条曲线的特点是:当雷电流大于 100kA 时,它的概率大于曲线 1 和 2,而且大得很多。组成曲线 3 的数据,大多是从较高的研究对象上获得的,这从理论上似乎可以解释为:较高的被击物体吸引了大部分雷电流幅值大的雷击。但是最近的研究结果并不支持这一结论^[1]。我国电力设备过电压保护设计技术规程(以下简称规程)推荐采用曲线 4 所示的概率值。比较曲线 1、3、4 可见,当雷电流幅值大于 20kA 时,曲线 4 的概率比曲线 1、3 均大,而且随雷电流幅值的增大而变得越来越大。因此,采用曲线 4 的数据进行防雷设计,结果是偏于保守的。雷云对地放电电流的第三个重要特性参数是雷电流波形达到峰值所需的时间。图 1-3 示出了不同来源的两条概率曲线,这两条曲线是相当一致的。有充分的数据证明,

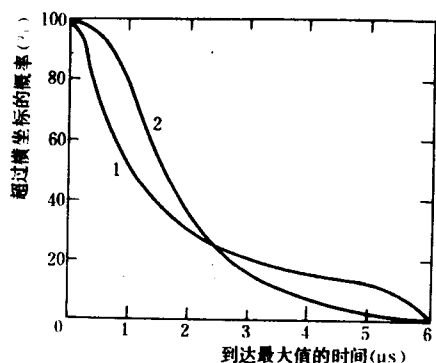


图 1-3 雷电流达到峰值的时间

1、2—不同研究者的成果

很大的雷电流峰值并不是与最大陡度同时发生的。现场测量数据说明，50%的雷电流上升率（陡度）超过 $7.5\text{kA}/\mu\text{s}$ ，10%超过 $25\text{kA}/\mu\text{s}$ ，超过峰值电流值的一半的雷电流持续时间的平均值是 $30\mu\text{s}$ ，有 18%的雷电流可达 $50\mu\text{s}$ 。

电气设备遭受雷击的危险性与雷电活动的强度有关。评定雷电活动强度的指标是年平均雷暴数，这当中又包括两种判据，一个是雷暴日，简称为 TD ，一个是雷电小时，但最好的指标是对地闪络密度 N_g ，经常用来估算对地闪络密度 N_g 的经验公式如下

$$N_g = (0.1 \sim 0.2) TD \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{年}) \quad (1-1a)$$

这个公式是不很精确的。我国的过电压保护规程建议采用以下数据

$$N_g = 0.015 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot TD) \quad (1-1b)$$

第二节 工频电压升高

短时过电压包括工频电压升高和谐振过电压，属于内过电压。

内过电压的能量来源于电网本身，所以其幅值和电网的工频电压大致有一定的倍数关系，通常以系统的最高运行相电压幅值 $U_{m\text{pm}}$ 为基础来计算过电压倍数 K 。

本节研究工频电压升高，第三节研究操作过电压，在绝缘配合中不考虑谐振过电压，故只在第七章第五节作一般性介绍。

与操作过电压相比，工频过电压倍数 K 并不大，对电力系统中具有正常绝缘的电气设备一般是不会有危险的，但由于以下原因，使工频电压升高成为超高压（e. h. v）系统中确定绝缘水平的重要因素。

(1) 工频过电压往往和操作过电压同时发生，二者叠加的结果，使操作过电压幅值增大。

(2) 避雷器应能在工频过电压作用下灭弧，因为避雷器的保护水平正比于灭弧电压，故电器设备的绝缘水平及其价格间接地决定于工频过电压的幅值。

(3) 工频过电压加上操作过电压决定了超高压输电线路的绝缘、线路尺寸，因而也决定了超高压输电线路的造价。

(4) 工频过电压持续的时间长（0.1~1.0）s，因而对油纸绝缘的内部游离、污秽绝缘子闪络、铁芯过热、电晕干扰等有重大影响。

工频过电压有以下几种：

一、空载长线末端电压的升高（费兰梯效应）

图 1-4 为长线的示意图，等效电源 E 通过电源阻抗 jX 向长线馈电。输电线首端电压为 U_1 ，末端电压为 U_2 ，末端负荷为 $P + jQ$ 。



图 1-1 考虑电源电抗的输电长线

众所周知，该线路波动方程的解是^[2]

$$\begin{aligned} \dot{E} &= U_1 + jI_1 X_s, \\ U_1 &= U_2 \cos \beta l + jZ_0 \frac{P - jQ}{U_2} \sin \beta l \\ I_1 &= j \left[\frac{U_2}{Z_0} \right] \sin \beta l + \frac{P - jQ}{U_2} \cos \beta l \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中的 $I_2 = (P - jQ) / U_2$ 。 $Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$ ， L_0 、 C_0 为线路单位长度的电感和对地电容， Z_0 定义为输电线路的波阻抗，与线路长度无关，其值与线路类型有关，架空输电线的 $Z_0 \approx 500\Omega$ ，计及电晕时取为 400Ω ，分裂导线为 300Ω ，GIS 为 $60 \sim 75\Omega$ ，电缆为 $30 \sim 80\Omega$ 。 $\beta = \omega \sqrt{L_0 C_0}$ ，称为相位系数，在 50Hz 时，其值为 $6^\circ/100\text{km}$ ，在 60Hz 时，其值为 $7.2^\circ/100\text{km}$ 。 l 为线路长度 (km)。

若将电源阻抗和输电线路均视为四端网络，则有以下关系

$$\begin{bmatrix} \dot{E} \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & jX_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta l & jZ_0 \sin \beta l \\ j\frac{1}{Z_0} \sin \beta l & \cos \beta l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1-4)$$

故首末两端电压电流之间的关系可表示为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{E} \\ I_0 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & jX_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta l & jZ_0 \sin \beta l \\ j\frac{1}{Z_0} \sin \beta l & \cos \beta l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \beta l - \frac{X_s}{Z_0} \sin \beta l & j(Z_0 \sin \beta l + X_s \cos \beta l) \\ j\frac{1}{Z_0} \sin \beta l & \cos \beta l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

令 $\varphi = \text{tg}^{-1} \frac{X_s}{Z_0}$ ，代入上式得

$$\begin{bmatrix} \dot{E} \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta l - \text{tg} \varphi \sin \beta l & j\frac{1}{Z_0} (\sin \beta l + \text{tg} \varphi \cos \beta l) \\ j\frac{1}{Z_0} \sin \beta l & \cos \beta l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1-5)$$

对空载长线, $I_2=0$, 则根据式 (1-5) 可求出

$$\dot{E} = (\cos\beta l - \operatorname{tg}\varphi \sin\beta l) \dot{U}_2$$

工频过电压倍数 K_{20} 定义为

$$\begin{aligned} K_{20} &= \frac{U_2}{E} = \frac{1}{\cos\beta l - \operatorname{tg}\varphi \sin\beta l} \\ &= \frac{\cos\varphi}{\cos(\beta l + \varphi)} \end{aligned} \quad (1-6)$$

从图 1-4 和式 (1-4) 可知, 对空载长线 ($I_2=0$), 有

$$K_{21} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\cos\beta l} \quad (1-7)$$

式 (1-7) 也可从式 (1-6) 令 $\varphi=0$ 得到。 $\varphi=0$, 也就是令 $X_s=0$, 即忽略电源电抗。从式 (1-6) 和式 (1-7) 可知, 过电压倍数 K_{20} 、 K_{21} 均大于 1, 这就是说, 空载长线末端电压高于首端电压, 这种现象是由线路的充电电流导致的, 并称之为费兰梯效应。比较式 (1-6) 和式 (1-7) 还可知, 考虑电源电抗后, 费兰梯效应更为严重, 也就是空载长线的末端电压升高得更多。

【例 1-1】 某 500kV 线路, 长为 400km, 电源漏抗 $X_s=263.2\Omega$, $L_0=0.9\text{mH/km}$, $C_0=0.01275\mu\text{F/km}$, 试求不计和计及电源漏抗时的工频电压升高倍数。

解:
$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = \sqrt{\frac{0.9 \times 10^{-3}}{0.01275 \times 10^{-6}}} = 265.68 \approx 266 (\Omega)$$

$$\beta l = 6^\circ \times 4 = 24^\circ$$

$$\varphi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{263.2}{266} = \operatorname{tg}^{-1} 0.989 \approx 44.7^\circ$$

不计 X_s , 则由式 (1-7) 知

$$K_{20} = K_{21} = \frac{1}{\cos 24^\circ} = 1.09$$

计及 X_s , 则由式 (1-6)

$$\begin{aligned} K_{20} &= \frac{\cos\varphi}{\cos(\varphi + \beta l)} = \frac{\cos 44.7^\circ}{\cos(44.7^\circ + 24^\circ)} \\ &= \frac{0.711}{0.363} = 1.96 \end{aligned}$$

由此例题可见, 线路越长, 末端电压升高愈多, 电源漏抗对空载长线末端电压升高有重要影响。电源漏抗越大, 末端电压升高愈多 (线路长度不变时), 电源漏抗使输电线路的电气长度增大。

二、甩负荷引起的工频过电压

当一条带有发电厂大部分出力的输电线跳闸时, 该厂的发电机就将加速运转, 从而使机端电压升高。甩负荷工频过电压是由三个原因造成的。第一, 甩负荷之初的短时间内, 发电机的磁链来不及变化, 与之相应的发电机暂态电势 E'_d 也将短时期内保持不变, 众所周知, E'_d 是大于送电端母线电压的, 甩负荷后, $U_1 \approx E'_d$, 因而导致工频过电压, 线路所带负荷愈重, 工频过电压将愈高。第二, 甩负荷后发电机转速将增大, 导致电势和频率都增大。当然, 由于调速器和励磁系统的作用, 会对这种上升产生抑制作用, 但由于惯性, 这

种抑制作用要滞后一个短的时间才能显现出来。第三，空载长线的费兰梯效应将使工频过电压更形严重。

下面研究考虑这三方面原因后的过电压值。

根据式 (1-2)，将 P 和 Q 表示为以自然功率 $P_0 = U_2^2 / Z_0$ 为基准的标么值： $P^* = P / P_0$ ， $Q^* = Q / P_0$ ，则可得

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \cos \beta l + j \dot{U}_2 (P^* - jQ^*) \sin \beta l \\ I_1 &= j \left[\frac{\dot{U}_2}{Z_0} \right] \sin \beta l + \frac{\dot{U}_2}{Z_0} (P^* - jQ^*) \cos \beta l \end{aligned}$$

则甩负荷前的暂态电势 E'_d 为

$$\begin{aligned} E'_d &= \dot{U}_1 + j I_1 X_s \\ &= \dot{U}_2 \cos \beta l + j \dot{U}_2 P^* \sin \beta l + \dot{U}_2 Q^* \sin \beta l \\ &\quad - \frac{\dot{U}_2 X_s}{Z_0} \sin \beta l + j \frac{\dot{U}_2 X_s}{Z_0} P^* \cos \beta l + \frac{\dot{U}_2 X_s}{Z_0} Q^* \cos \beta l \\ &= \dot{U}_2 \cos \beta l \left[\left(1 + Q^* \frac{X_s}{Z_0} \right) + \left(Q^* - \frac{X_s}{Z_0} \right) \operatorname{tg} \beta l + j P^* \left(\frac{X_s}{Z_0} + \operatorname{tg} \beta l \right) \right] \quad (1-8) \end{aligned}$$

其模为

$$E'_d = U_2 \cos \beta l \sqrt{\left[\left(1 + Q^* \frac{X_s}{Z_0} \right) + \left(Q^* - \frac{X_s}{Z_0} \right) \operatorname{tg} \beta l \right]^2 + \left[P^* \left(\frac{X_s}{Z_0} + \operatorname{tg} \beta l \right) \right]^2} \quad (1-9)$$

【例 1-2】 线路长为 300km， $\frac{X_s}{Z_0} = 0.3$ ， $P^* = 0.7$ ， $Q^* = 0.22$ ，求甩负荷前 $\frac{U_2}{E'_d} = ?$

解： 从 $l = 300\text{km}$ 知 $\alpha l = 18^\circ$ ，由式 (1-9) 可知

$$K_{20} = \frac{U_2}{E'_d} = \frac{1}{\cos \beta l \sqrt{\left[\left(1 + Q^* \frac{X_s}{Z_0} \right) + \left(Q^* - \frac{X_s}{Z_0} \right) \operatorname{tg} \beta l \right]^2 + \left[P^* \left(\frac{X_s}{Z_0} + \operatorname{tg} \beta l \right) \right]^2}}$$

将 $\cos \beta l = 0.951$ 、 $\operatorname{tg} \beta l = 0.325$ 及已知数量代入上式得

$$\begin{aligned} K_{20} &= \frac{U_2}{E'_d} = \frac{1}{0.95 \sqrt{\left[(1.066) - (0.026)^2 \right] + (0.4375)^2}} \\ &= \frac{1}{0.95 \sqrt{1.0816 + 0.1914}} = \frac{1}{0.95 \sqrt{1.273}} \\ &= \frac{1}{0.95 \times 1.128} = \frac{1}{1.072} = 0.933 \end{aligned}$$

即使不考虑其它因素，因为甩负荷后全线各点的电压都将等于 E'_d ，则甩负荷前 (U_2) 后 (U'_2) 末端电压之比 $\frac{U'_2}{U_2} = 1.072$ 。

现在研究甩负荷后发电机转子超速的影响。在甩负荷的短时间内，频率由 f_0 增至 f ，导致 E'_d 增大， β 增大， X_s 增大。

U_1 增大的情况可由式 (1-10) 来估算，即

$$U_1 = \frac{(f/f_0) E'_d}{\left[1 - (f/f_0) \frac{X_s}{X_c} \right]} \quad (1-10)$$

式中 X_s —— E'_d 与 U_1 之间的电抗 (通常是电机暂态电抗和变压器电抗之和)；

X_c ——末端开路输电线的电容性输入电抗 (在升高频率下的)；

f_0 ——额定频率；

f ——当电压到达最大值时的频率瞬时值。

使用该式的困难在于确定 f 之值。

对汽轮发电机组，甩满负荷时最大速度上升约 10%，在 1s 之内可达此值。这时转子磁链还没有发生太大变化，最大电压可用式 (1-10) 来近似计算。 f 使用与最大速度升高时相对应的瞬时频率值。

对水轮发电机，在甩满负荷时的最大速度升高可达 60%，但却需费时 10s 才能达到，在那以前，快速作用的电压调节系统早已开始减少励磁，最大电压可能发生在甩负荷之后 1s 的时刻。由于没有更为精确的方法，在这种情况下要使用式 (1-10) 时，只能假定在到达最大转速之前瞬时频率 f 是按线性规律增大的。

一种简单处理办法认为， E'_d 、 β 、 X_s 都按 f/f_0 之比线性增大，然后综合考虑超速与费兰梯效应求 U'_2 。

由式 (1-6) 得

$$U_2 = \frac{E}{\cos \beta l - \frac{X_s}{Z_0} \sin \beta l}$$

则甩负荷后的 U'_2 为

$$U'_2 = \frac{E'_d (f/f_0)}{\cos (\beta l f/f_0) - \frac{(f/f_0) X_s}{Z_0} \sin (\beta l f/f_0)} \quad (1-11)$$

将式 (1-9) 代入式 (1-11) 并加以整理得

$$\frac{U'_2}{U_2} = \frac{f/f_0 \left\{ \cos \beta l \sqrt{[(1+Q \frac{X_s}{Z_0}) + (Q - \frac{X_s}{Z_0}) \operatorname{tg} \beta l]^2 + [P \cdot (\frac{X_s}{Z_0} + \operatorname{tg} \beta l)]^2} \right\}}{\cos (\beta l f/f_0) - \frac{(f/f_0) X_s}{Z_0} \sin (\beta l f/f_0)} \quad (1-12)$$

【例 1-3】 同例 1-2，若 $f/f_0 = 1.05$ ，求 U'_2/U_2 及过电压倍数 K'_{20} 。

解： 将有关参数代入式 (1-12) 得

$$\begin{aligned} \frac{U'_2}{U_2} &= \frac{1.05 \times 1.072}{\cos (1.05 \times 18^\circ) - (1.05) (0.3) \sin (1.05 \times 18^\circ)} \\ &= \frac{1.1256}{\cos 18.9^\circ - 0.315 \times \sin 18.9^\circ} = \frac{1.125}{0.946 - 0.315 \times 0.324} \\ &= \frac{1.125}{0.946 - 0.102} = \frac{1.125}{0.844} = 1.33 \end{aligned}$$

这说明，题示条件的输电线路，在甩负荷后的末端电压将等于带负荷时的 1.33 倍。

因为

$$K_{20} = \frac{U_2}{E'_d}, \quad E'_d = \frac{U_2}{K_{20}}$$

故甩负荷的过电压倍数为

$$\begin{aligned} K'_{20} &= \frac{U'_2}{E'_d} = \frac{U'_2}{U_2/K_{20}} \\ &= K_{20} \frac{U'_2}{U_2} = 0.933 \times 1.33 = 1.24 \end{aligned}$$

K_{20} 由例 1-2 已知, U'_2/U_2 由本例第一部分求出。

三、自励磁工频过电压

当空载输电线产生的无功功率超过与该线路连接的各个发电机所能吸收无功的能力时, 便存在产生自励磁过电压的危险。在电容性荷载的条件下, 电枢反应有助磁作用, 为了使母线稳态电压保持其额定值, 只需要很小的激磁电流或甚至需要负的激磁电流。为了在这种环境下维持电压稳定性, 必须满足某些条件。对无补偿线路:

(1) 若

$$X_c (f_0/f)^2 > X_d \quad (1-13)$$

则激磁是正确的, 即使用人工方法亦能稳定地加以控制。式中的 X_d 是直轴同步电抗加升压变压器的电抗。

(2) 若

$$X_q < X_c (f_0/f)^2 < X_d \quad (1-14)$$

这时机组处于“慢速自激磁”的状况, 若使用连续作用的自动电压调节器, 则电压可稳定地加以控制。式中的 X_q 是横轴同步电抗加变压器的电抗。

(3) 若

$$X_c (f_0/f)^2 < X_q \quad (1-15)$$

则发电机处于快速自激磁状态, 电压升高迅速且不可控, 只受发电机和变压器铁芯饱和的限制。这种状态是不允许发生的, 要不惜一切代价予以防止。办法有二: 一是保证母线上有足够的发电机容量以吸收线路产生的无功, 一是使用并联电抗器补偿, 以吸收部分线路充电无功功率。这三个式子中的 X_c 、 f 由前面所述的方法确定。

四、接地故障引起的工频电压升高

单相对地故障会引起健全相上的对地电位的升高, 电位升高的程度主要与中性点接地情况有关。中性点绝缘或中性点通过消弧线圈接地的系统, 健全相上的电位可能超过线电压; 对中点直接接地系统, 健全相上的电位仍将升高, 但却低于线电压。两相短路接地故障也可能引起相电压的升高, 但概率较小。

单相接地故障引起的电位升高是用“接地系数”来量度的, 它定义为两健全相中电位较高一相的电位与故障发生前同一地点的相电压的比值, 它可用对称分量法计算出或从图 1-5 所示的曲线族中查出^[3]。假若一个电力系统的接地系数不超过 1.4, 则这个电力系统就叫做有效接地系统, 这已为国际标准及许多国家的国家标准所接受。直接接地系统通常都遵守这

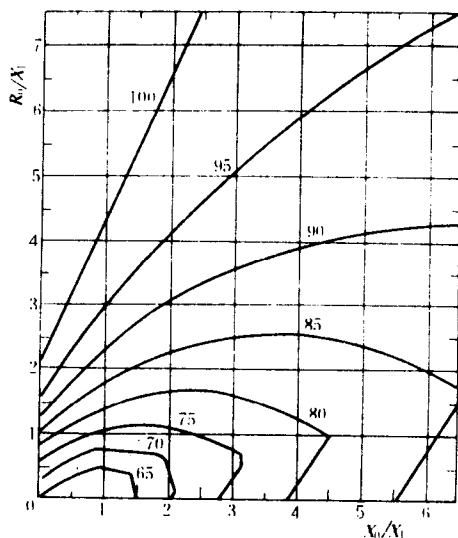


图 1-5 中性点直接接地系统在故障状态下故障点的最大相电压

注 各个曲线上的数字是任一相上的最大线对地电压, 用线电压的百分数表示, 计算时考虑了故障电阻的作用。 R_0 为零序电阻; X_0 、 X_1 、 X_2 为零序、正序、负序电抗, $X_1 = X_2$; 计算时取 $R_1 = R_2 = 0.1X_1$ 。

一规定。从图 1-5 所示的曲线中可以看出, 若满足

$$X_0/X \leq 3.0 \text{ 和 } R_0/X_1 \leq 1.0 \quad (1-16)$$

则该系统就是有效接地系统。

用对称分量法及复合阻抗图可计算出单相接地系数, 即

$$K = -\frac{1.5Z_0}{Z_0+Z_1+Z_2} \pm j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{(2Z_2+Z_0)}{(Z_0+Z_1+Z_2)} \quad (1-17)$$

式中的 Z_0 、 Z_1 、 Z_2 分别为电力系统的零序、正序和负序阻抗。对电源容量较大的电力系统, $Z_1 \approx Z_2$, 若忽略阻抗中的电阻分量 R_0 、 R_1 、 R_2 , 则上式可简化为

$$K = -\frac{1.5 \frac{X_0}{X_1}}{2 + \frac{X_0}{X_1}} \pm j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

其模为

$$K = \sqrt{\left(\frac{1.5X_0/X_1}{2+X_0/X_1}\right)^2 + \frac{3}{4}} \quad (1-18)$$

式中 X_1 为电力系统的正序电抗, 包括发电机的 X'_d 、变压器的漏抗及线路感抗, 一般为感性的 (正值); X_0 为线路导线对地容抗与中性点对地电抗的并联值, 其值可正可负, 视中性点接地情况而定。

由式 (1-18) 可见, 零序电抗对接地系数的影响极大。在超高压系统中, 通常正序电阻 R_1 可忽略不计, 而零序电阻 R_0 对工频电压升高却有一定的影响。图 1-5 是以 X_0/X_1 为横坐标、 R_0/X_1 为纵坐标绘制的, 图中曲线上的数字是健全相上最大工频电压升高的百分数 (以线电压即额定电压为基准)。图 1-6 则直接绘出了接地系数 K 与 X_0/X_1 、 R_0/X_1 之间的关系。由图可见, 当 X_0/X_1 为不大的正值时, 健全相电压低于额定电压; 当 X_0/X_1 在负值范围内变化时, K 与 R_0/X_1 有关。 R_0/X_1 愈大, K 愈小, 但恒有 $K > 2$ 。当 $X_0/X_1 = -2$ 时, $K \rightarrow \infty$, 一般不会达到这种状态, 但若在三相母线上接有电容量较大的电容器组时 (为了防雷的需要), 会使 X_0/X_1 值降低, 应加以验算, 以免出现过高的工频过电压。

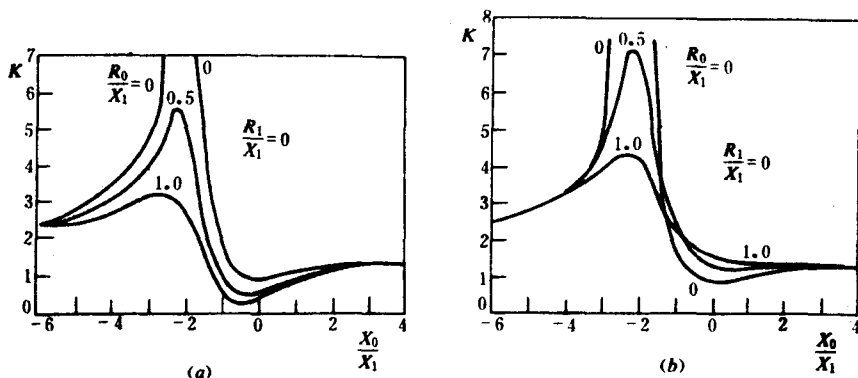


图 1-6 A 相接地时健全相 B 和 C 上的工频电压升高

(a) B 相; (b) C 相

单相接地故障引起的工频过电压对避雷器的工作有重大影响, 因为阀型避雷器应在这种升高电压下熄灭电弧。3、6、10kV 系统的中性点是绝缘的, X_0/X_1 值在 $-20 \sim -\infty$ 的范围内变化, 单相接地时系统健全相上工频电压升高可达 $1.1U_m$ (U_m 为系统最大工作电压), 因此应采用灭弧电压为 $1.1U_m$ 的避雷器, 即所谓 110% 避雷器, 例如 10kV 系统的 $U_m = 1.15U_n$ (U_n 为系统额定电压), 避雷器的灭弧电压就应为 $1.1 \times 1.15U_n = 1.1 \times 1.15 \times 10 = 12.65 \approx 12.7$ (kV)。35~60kV 系统的工频电压升高可达 U_m , 避雷器的灭弧电压就应为 $100\%U_m$, 称为 100% 避雷器, 例如 35kV 避雷器的灭弧电压就应为 $U_m = 1.15U_n = 1.15 \times 35 = 40.25 \approx 41$ (kV)。110kV 及以上的电力系统, 其变压器的中性点全部或部分接地, $X_0/X_1 \leq 3$, 称为有效接地, 单相接地故障时, 健全相上电压升高不超过 $0.8U_m$, 故选用 80% 避雷器, 如 FZ-110J 的灭弧电压为 $0.8U_m = 0.8 \times 1.15 \times 110 = 101.2 \approx 100$ (kV)。500kV 的最高工作电压按 $1.1U_n$ 考虑, 所以 FCZ-500J 的灭弧电压为 $0.8 \times 1.1 \times U_n = 0.8 \times 1.1 \times 500 = 440$ (kV)。对 330kV 以上系统, 因输送距离较长, 计及费兰梯效应, 线路末端的工频过电压可能超过 $80\%U_m$, 故应根据安装位置的不同, 分别选用电站型 (80% 避雷器) 和线路型 (90% 避雷器) 的。

五、饱和效应

当电压高于额定值时, 变压器激磁电流迅速增加, 在 1.5 倍额定电压下, 其值等于额定电流。如果甩负荷是由于受电端变压器的低压侧断路器断开引起的, 则甩负荷过电压就可能由于变压器的饱和效应而有所削弱。如果饱和特性已知的话, 则这个问题可用图解法求解。

变压器的激磁电流并不总是有利的。饱和变压器向电网注入相当大的谐波电流, 这是其不利的一面。通常, 在磁通为 2Wb/m^2 (相应的电压是 1.2pu) 时, 三次谐波可高达激磁电流的 65%, 五次谐波达 35%, 七次谐波达 25%。这些谐波电流从变压器激磁支路流进由发电厂支路的电感和输电线支路的电容组成的网络中。对三次序列谐波, 零序值是有效的, 三角形连接的绕组可以消除这些谐波。发电机用次暂态电抗表示, 受频率的制约。假若系统的并联谐振频率与谐波频率相近, 网络中就可能出现高的谐波电压, 并与基频过电压相叠加, 这就可能抵消甚至超过饱和对基频过电压的削弱。对较高次的谐波, 变压器激磁电感与线路电容的串联谐振可能引起更高的过电压。由于电路的非线性, 分析这种过电压最好采用暂态网络分析仪 (TNA)。有兴趣的读者可参阅 D. C. Smith 等人的论文^[1], 关于 TNA 的有关知识, 第七章第三节将作介绍。

第三节 操作过电压

本章一开始就曾指出, 操作过电压是超高压 (e. h. v.) 系统绝缘设计的依据, 所以降低操作过电压在经济上是必要的。

对操作过电压的研究, 是与电力系统的发展相联系的。

早期的输电网络, 输送容量不大, 输送电压不高, 电力系统中性点是绝缘的。在这种网络中, 单相接地故障引起的间歇性电弧接地过电压是当时主要关心的操作过电压。过电压倍数 K 可达 $3.1 \sim 3.5$, 主要限制措施是将中性点通过消弧线圈接地。随着输送容量的增