

高压电力系统的 绝缘配合

353

水利电力出版社

Insulation Co-ordination
in High Voltage Electric Power Systems
W. Diesendorf
Butterworths London 1974

高压电力系统的绝缘配合

〔澳〕W·迪森朵夫

水力电力出版社出版

（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

水力电力出版社印刷厂排版

长春市印刷厂印刷

1976年8月北京第一版

1976年8月长春第一次印刷

印数 00001—16710册 每册0.47元

书号 15143·3207

说 明

遵照毛主席关于“独立自主、自力更生”和“洋为中用”的教导，我们组织翻译了《高压电力系统的绝缘配合》一书。

本书搜集了一些基本公式、曲线和数据，介绍了电力系统过电压的种类和应用数理统计方法分析绝缘配合的概念，并附有实例说明。书中还列有有关的文献，可供进一步研究时参考。

阅读本书时，必须考虑我国的具体情况，有分析、有批判地参考。

译文中对原文个别明显的错印处作了更改。各章写在方括号内的数目字，代表各该章的参考文献号。参考文献分章附于书末。

本书由东北电力设计院送变电室送电二队译校，并请武汉高压研究所有关人员校核。

译文中如有不妥之处，请读者批评指正。

水利电力出版社

一九七六年一月

目 录

说 明

第 1 章	导 言	1
第 2 章	过电压	3
2-1	雷电冲击波	4
2-2	暂态过电压	10
2-3	操作过电压	18
第 3 章	击穿和耐受电压	30
3-1	引言	30
3-2	自恢复绝缘	31
3-3	非自恢复绝缘	49
第 4 章	输电线路上的雷电过电压	53
4-1	引言	53
4-2	雷击邻近大地	55
4-3	屏蔽	56
4-4	雷击杆塔	63
4-5	雷击避雷线	69
4-6	确定线路绝缘所受电压的实用方法	70
4-7	雷电波的衰减和畸变	73
第 5 章	输电线路的耐雷特性	79
5-1	引言	79
5-2	无避雷线线路的闪络率	80
5-3	有避雷线线路的闪络率	81
5-4	跳闸率和持续跳闸率	90

第6章	输电线路的操作过电压设计	95
6-1	概论	95
6-2	杆塔绝缘设计	99
6-3	对未来特高压的应用	105
第7章	高压变电站的绝缘配合	107
7-1	原则	107
7-2	过电压保护装置	108
7-3	有保护区的变电站	118
7-4	无保护区的变电站	132
7-5	由电缆联结之设备	132
附录A	行波的传播	134
附录B	220千伏线路耐雷特性计算用数据	140
参考文献(分章排列)		142
第1章	参考文献(无)	142
第2章	参考文献	142
第3章	参考文献	144
第4章	参考文献	145
第5章	参考文献	147
第6章	参考文献	148
第7章	参考文献	148
参考书目		150

第1章 导 言

由停电次数和停电时间来衡量的电力系统的可靠性，在很大程度上决定于该系统的冲击特性。尽管停电还有其他很多原因，而绝缘击穿却是停电最常见的原因之一。

要是绝缘只承受变动很小的正常运行电压，那就不存在问题。实际上，绝缘必须承受波形、幅值和持续时间都相差很大的多种过电压。过电压的这些参数会影响到绝缘的耐压能力，因此摆在我们面前的问题是：

确定过电压的幅值、波形、频率及其持续时间，以及确定它们从起点进行到受害设备过程中所发生的变化；

确定各种实用的绝缘方式在这些过电压作用下的耐压特性；

使绝缘的强度与实际所受电压相适应。

人们很快发现，欲使绝缘足以耐受可能出现的最大过电压，并非总是合理的。远在技术上受限制以前，经济问题就介入了。在工程中，是以进一步改善可靠性所需之费用，不再为减少绝缘事故所带来之节省所补偿时，作为一个界限；但后者是很难估算的。于是就在电力系统的设计中，经过一番衡量，采用一个确定的击穿概率。在这方面，其设计原则就不同于土建工程师，他设计的这些结构要耐受所有的能预见到的应力，因为这些结构的倒塌能引起灾难性的后果。

另一方面，电力系统的设计应使，当击穿不可避免时，它们应被限制在损害最小且对运行扰乱最小的部位。损害最

严重的是固体绝缘的局部击穿；而最轻微的是自恢复绝缘的闪络；在后一情况下，并非每一次闪络都会导致开关的动作。

绝缘事故对供电的影响，可以通过诸如快速而灵敏的继电保护、采用双回路或提供备用的电源、以及装设自动重合闸等手段来减到最小，但这些技术已超出本书的范围。

第2章 过电压

电力系统的过电压分为外部过电压和内部过电压；外部过电压是由大气放电引起的，亦称作雷电过电压；内部过电压是由于运行操作或产生故障而在电力系统内部产生的；内部过电压又分为“暂态过电压”和操作过电压，前者为工频或谐波频率，且为持续或弱衰减的，而后者则时间短且衰减快。由于二者同一根源，暂态过电压和操作冲击波就同时出现。与绝缘设计有关的，乃是它们的联合效果。另一方面，雷电和操作波同时出现的概率却很小，可以忽略。

出现在输电线路上的雷电波幅值，受线路设计的影响不大，因此，绝缘水平随系统电压的升高而提高时，防雷性能趋向于改善。另一方面操作波幅值基本上与运行电压成正比，于是，存在着这样一个系统电压，这时设计重点将从雷电转向操作过电压，这一转变大约出现在300千伏。在超高压范围内，包括现有的最高系统电压765千伏，雷电和操作过电压二者都需要考虑。对于目前尚在研究中的特高压，操作波将是主要的，但还不是唯一的判断标准；特别是绝缘污秽将仍然是重要的设计因素。

外绝缘和空气间隙的操作冲击强度，约从1兆伏以上，就不再与闪络距离成正比地上升了，这与雷电冲击强度不一样。这一事实更加重了操作过电压的重要性。

研究过电压问题，必须具备冲击波传播规律的基础知识。文献〔1、2及7的第15章〕可供参考。本书附录A只限于概述一些主要关系式。

2-1 雷电冲击波

2-1-1 雷电现象

研究雷电对电力系统的影响以前，应了解一下它的自然特征。

当雷雨时，由于气流、云层上部的冰晶以及其下部的水滴间的相互作用使得正、负电荷被分离开来。这一过程是很多理论的研究课题^[3~7]，但我们感兴趣的是下述可观察到的事实：云层顶部有一正电荷层，典型地高达9~12公里，云层的大范围上则带有负电荷，而靠近云底又被包有小块正电荷。负电荷的中心可能高出地面500~10000米，而云底却可能低到150米。雷云的电位估计至少为100兆伏。

从肉眼看来，雷击大地通常呈现为一次闪光放电，有时也能看到其亮度的迅速波动，旋转照相机所拍摄的照片表明，大多数雷击是重复的，它沿着第一次放电时所建立的通道再闪击，时间间隔为0.5~500毫秒。

雷击是由逐步跃进的先导放电所触发的。先导放电从云区开始，那儿的局部电荷集中，使电场强度达到了击穿的临界值。海平面上干燥空气的击穿电场强度为30千伏/厘米，但在高海拔充有水滴的云区，它大约只有此数值的1/3。先导含有一个高度离解的芯子或通道。通道的前头及其周围是一电晕套，电晕套的直径约为30米，在通道的前面电晕套约扩张至50米。先导的尖端以每步约50米迅速运动，每推进一步后约停歇数微秒，这时就从它射出一些“流注”使电晕套充电以帮助它前进。推进的平均速度约为150公里/秒。若雷电中心至大地的距离，设为3000米，则先导约需时20毫秒来打通它。

各步都是条直线，但空间电荷和风的作用，则使各步的方向有所改变。所出现的分岔可能于中途终止，但主通道则以折线路径通至大地。当“逐步跃进的先导”缓慢下降时就在沿途留下了负电荷。随着先导头部趋近大地，在靶子区所感应的正电荷也就加强，但命中点直到先导到达离地面某一确定的“闪击距离”前仍然是不确定的。在这一闪击距离下，先导中的电荷使“地电极”之电场强度已大到足以引起击穿。由于电场的不均匀性，按闪击距离计算的平均临界电场强度约为干燥空气的击穿电场强度的 $1/6$ 。

在这一阶段，短的正流注开始从地面之突出物升起。当负先导碰上正流注时，大地与云层之间便产生发光强烈的放电，放电的传播速度约为光速的 $10\sim 50\%$ ，视电荷密度而定。这一放电称为“主放电”。这时，先导放电时沿途所留下的负电荷，为向上运动之正电荷所迅速中和，后者系在大地或地面物体上所感应出的。光亮点表示任一瞬间正电荷所穿透的边界。击中点的电流，既可视作流入大地的负电流，也可视为流出大地的正电流。有一小部分落雷，注入大地的是正电流。主放电电流在数千安至约260千安范围内。它比先导中的电流要大得多，这是因为两过程所包含的电荷量相同，而电流与电荷运动速度成比例。

在第一次主放电使雷云中部分电荷宣泄后，“流注”即从更高的带负电荷的云区发展，并创造通道联至第一次放电的，当时仍然是电离的而且被加热了的途径。在雷云和大地之间沿着这一路径展开了一个“快速先导”，它不分岔，放电速度要高于“逐步跃进的先导”的速度。当触及地面时，第二次主放电又返回云层。这一过程可能重复多次。 $30\sim 80\%$ 的落雷至少有两次分闪击，约 20% 有 $3\sim 5$ 次分闪击，但可高达40次。

业已明确，云内或从云层到云层的闪络要远多于云地之间的闪络。“云间闪络”对“云地闪络”的比值，在温带为1.5~3，而在热带为3~6^[8]。

2-1-2 落雷特征

从20年代后期开始，为确定影响线路运行的雷击特征，曾进行了大量的野外研究工作（参看文献7的16章）。遗憾的是，直到今天，有用的情报既不确定也不完整。

雷电流示波图表明，在起始有一个高电流部分，它的特征是波头长度短，一般不超过10微秒。波头通常是向上凹的。在历时数十微秒的高电流部分以后，是历时长而电流低的波尾，它可能长达几百毫秒，并且是热危害即所谓“热雷”的原因。典型的示波图如图2-1。雷电流可以从高塔或

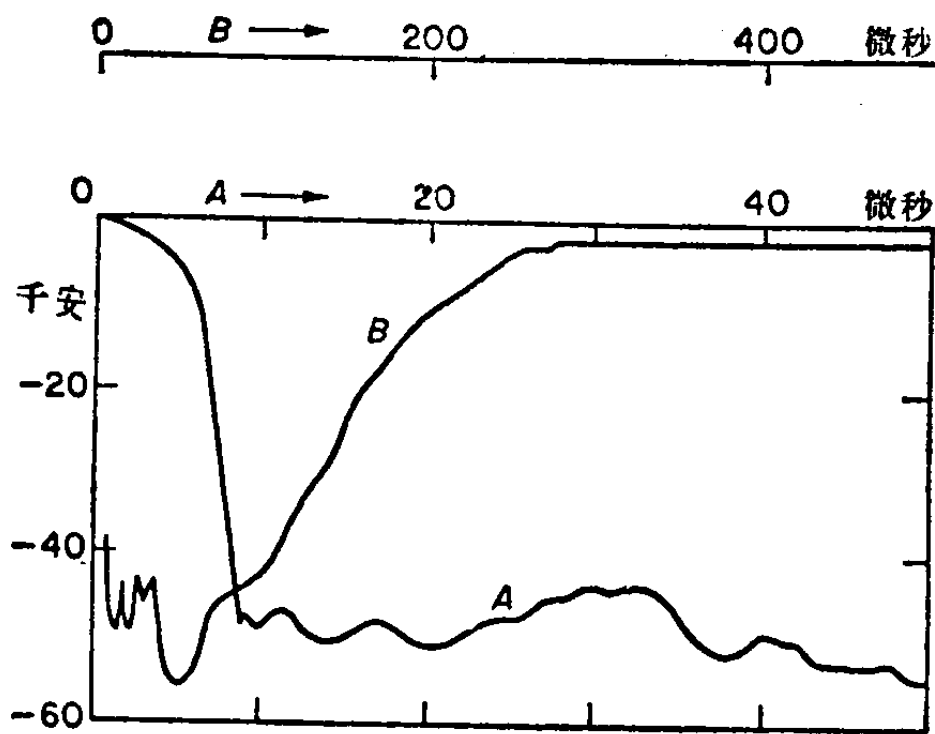


图 2-1 典型雷电流示波图^[6]

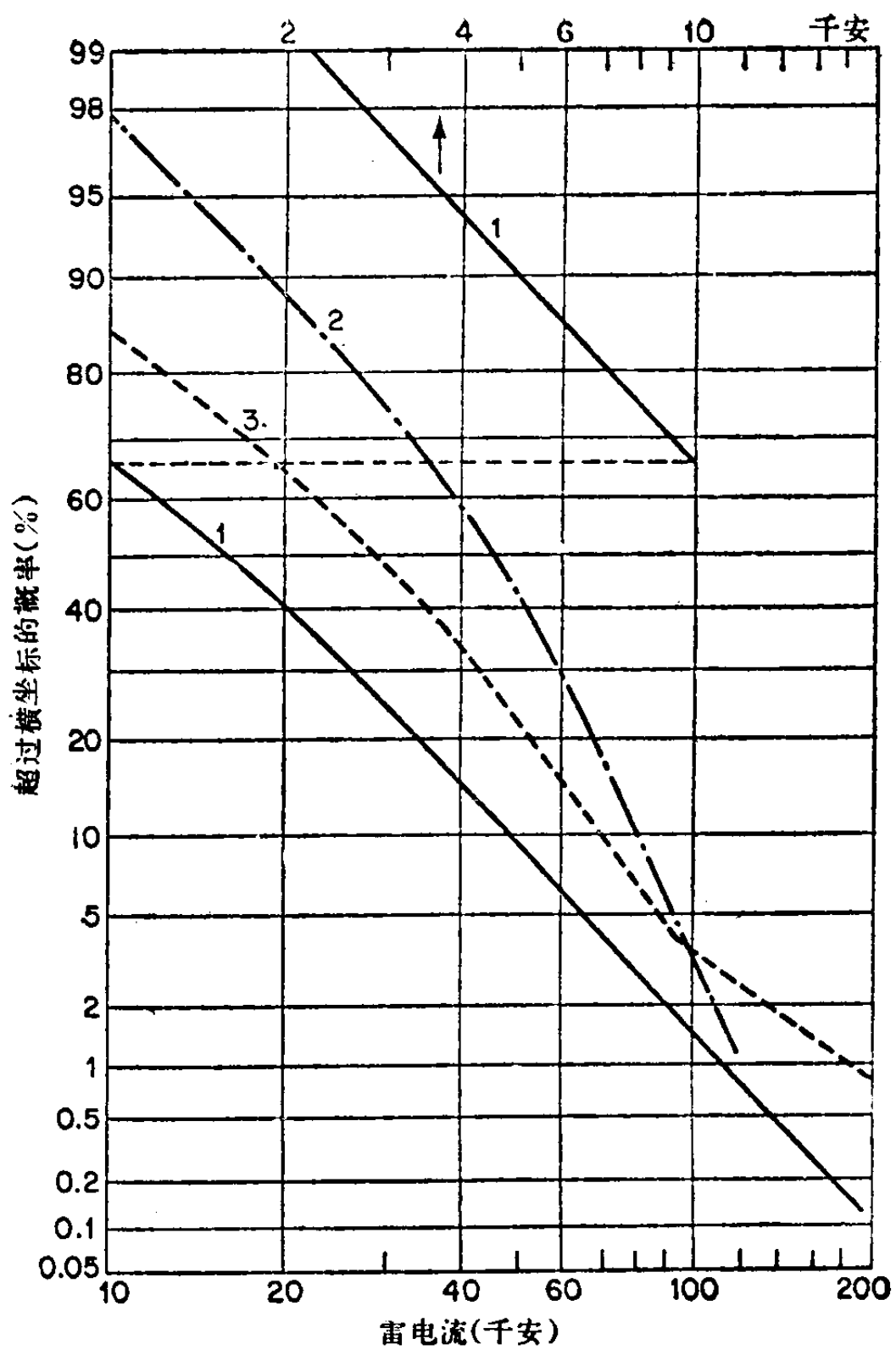


图 2-2 雷电流幅值的累积分布⁽⁹⁾
 1—按照文献⁽⁹⁾的资料；2—按照文献⁽¹⁰⁾的资料；
 3—按照国际大电网会议文件，№22，139-147(1972)

建筑物上直接测得,这时,它们并非输电线的真实情况;雷电流亦可从线路铁塔的4条腿上测得,这时由于4条腿的电流分配不均和避雷线及邻近杆塔的存在,因而它也是不准确的。AIEE(前美国电机工程学会)的一个委员会,依据大量的研究成果^[9],制作了电流幅值的频率分布,如图2-2中的曲线1。它广泛用于耐雷特性的计算。更令人悲观的曲线也曾有人建议过,例如图2-2的曲线2^[10]。有趣的是国际大电网会议(CIGRE)的一个研究委员会的一分新资料,它主要以雷击高建筑物为依据,它所建议的大雷电流(超过100千安)的概率,要比前两条曲线大得多(曲线3)。理论上可以说明,高建筑物会吸引更大份额的大电流落雷,这就可从解释何以频率分布曲线会移向较高电流部分^[11]。

另一重要特征是电流波的波头时间。图2-3重绘了两个

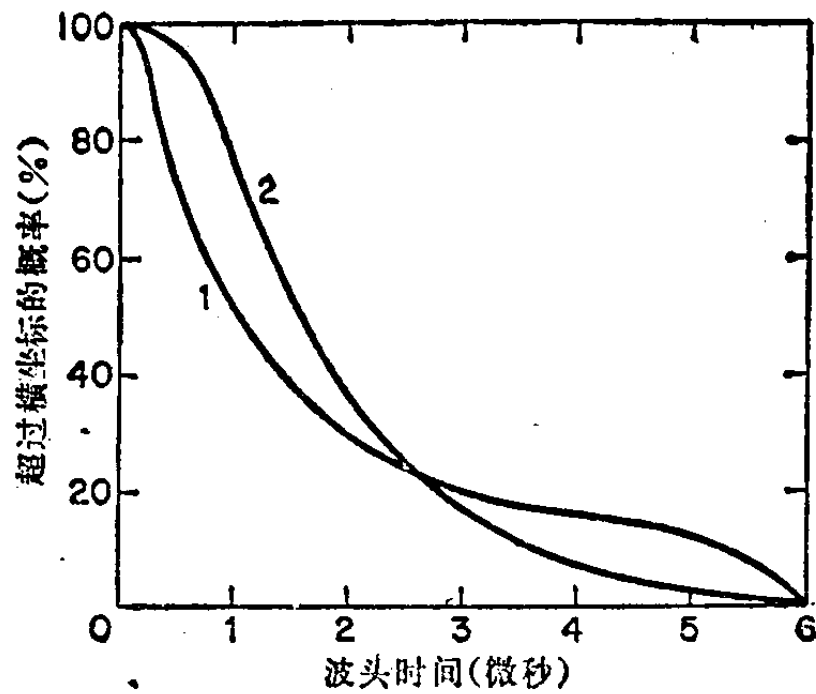


图 2-3 雷电流波头时间

1—按照美国电机工程学会Trans.60,885(1941); 2—按照文献⁽¹⁰⁾, 288页的资料

来源的概率分布曲线，二者比较一致。有证据表明很大的雷电流并不同很短的波头时间一同出现。现场资料表明，50%的雷电流陡度超过7.5千安/微秒，10%超过25千安/微秒。电流降到半峰值的时间即波长平均为30微秒，而波长大于50微秒的占18%。

电气设备遭受雷击的危险必然是同雷暴的活动程度有关。全球各国的气象单位以及设在日内瓦的世界气象组织所能提供的指标是等雷水平或称雷电日数(TD)，其定义是在任何地点于一年或一月中所能听到雷声的日数。从输电工程师的观点看来，这一尺度的缺点是，它未能区别对地闪击和云间闪击，也不能识别雷暴的持续时间及其不同的强烈程度。稍好的尺度是雷电小时，但最适宜的尺度却是大地落雷密度(N_g)。目前正在试图积累有关 N_g 的充分的统计资料。为此目的业已搞出了“闪电计数器”^[8,13]。由于这类装置对邻近的云间闪击和对地闪击都有反应，因此必须在每一地区利用光学或其他观察方法将其校正成对地闪击^[8,14]。直到这种或类似装置能给出更多的数据以前，雷电强度仍将依据雷电日水平来估计。

一个经常采用但并不精确的大地落雷密度的经验公式为

$$N_g = (0.1 \sim 0.2)(TD) \text{ 次/平方公里} \cdot \text{年} \quad (2-1)$$

更可靠的关系式还需等待现场记录的结果。

在英国、欧洲以及北美洲的太平洋沿岸，雷电日数(TD)的范围是5~15； N_g 约为1.0~2.0，在美国，雷电日随着趋向中部和东部各州而增加，在那儿普遍的水平是30~50，并在佛罗里达州达到80这个顶峰。更高的雷电水平地区存在在南非洲和南美洲。

落雷和输电系统的相互作用将在第4和第5章中论述。

2-2 暂态过电压

2-2-1 引言

在绝缘配合中暂态过电压的重要性在于，避雷器必须能在这种电压下灭弧，否则就要损坏。无论那种类型的避雷器，其保护水平与其灭弧电压成比例，因此设备的绝缘水平和费用就间接地与暂态过电压的数值有关（参看7-3-2）。在超高压的范围内，暂态过电压连同操作过电压决定了输电线路的绝缘，因而决定了它的尺寸和费用。

在本节我们感兴趣的工频过电压，其主要起因是：

突然失去负荷，切断感性负荷或接入容性负荷；费兰梯效应（Ferranti effect）以及不平衡的接地故障。

频率与工频相差不多的过电压，可以在切断并联补偿的线路时出现，这时被残留的电荷将在线路电容和电抗器电感之间振荡。高次谐波频率的振荡可为空载变压器的励磁电流所激发，而分次谐波振荡则可由串联电容器同轻载变压器或电抗器间的谐振产生。单相切除以及断线可以引起铁磁谐振过电压，但对这种或其他罕有情况，应防止其出现，以避免过多的绝缘费用。

暂态过电压的持续时间可以从几个周波（假如装有电压继电器），或几秒（如果降压依靠自动电压调整器）直到更长时间（假如只能指望操作人员的干预）。

甩掉满负荷使感性负荷变成容性负荷（例如有载线路的远方开关跳闸），再加上同时出现接地故障，这二者的联合会引起严重的工频过电压。若其他线路或本地负荷使功率有一定出路，则甩掉电厂的全部负荷就不太可能。一般说

来，系统联网愈密，切除负荷而引起的过电压就愈低。但这种状况易于出现在业已发展了的系统，而在新建更高一级电压的初期阶段却不太容易出现。对于长距离线路，通过并联电抗器可使情况大为改善，电抗器或者永久联接，或者在发生过电压时由专门的火花间隙迅速投入。而电抗器经常是补偿无功的充电容量所必需的（见2-2-4）。

2-2-2 负 荷 切 除

若输送电厂输出的主要部分的线路被切除，发电机就要增速，电压也要升高。这时，调速器和自动电压调整器将会朝着恢复正常条件的方向进行干预。欲准确地确定母线所能达到的最高电压，就需要具备关于电机参数、调速器和励磁系统的充分知识，还需借助诸如数字或模拟计算机之类的数学工具。有关的研究叙述在^[15~17]中。

作为一个近似的估计，但已够一个初步处理的要求，可以假定开始时“次暂态电势”维持不变，仍然保有事件前的数值，而在若干周波后，“暂态电势” E'_d 即成为恒定的驱动电势。如忽略损耗和短暂的次暂态， E'_d 和送端母线电压（ V_1 ）间的关系将为：

$$V_1 = \frac{f}{f_0} E'_d / \left[1 - \left(\frac{f}{f_0} \right) X_s / \bar{X}_c \right] \quad (2-2)$$

此方程通过增速对 E'_d 的影响计入了与增速相联系的电压升高，还考虑了感抗和容抗随频率的变化。 X_s 为 E'_d 和 V_1 间的电抗（通常它就是电机暂态电抗和变压器电抗之和）， $\bar{X}_c$ 为处于开路的线路在升高的频率下的输入容抗，而 f/f_0 则为出现最大电压时的瞬时频率对额定频率的比值。困难在于确定 f 。

对于汽轮发电机，在切除满负荷时的最大速度升高约为10%，并在不到一秒的时间出现。这时转子的磁链尚变化不多，故最大电压可按方程 2-2 近似地算得，所用瞬时频率系对应于切除负荷后的最高转速。

对于水轮发电机，切除满负荷时的最大速度升高可高达60%，但可能需时10秒才能达到。而快速调压系统远在此前即已开始降低励磁，从而最高电压或许会出现在负荷切除后一秒光景。由于缺少准确的方法，方程 2-2 中的瞬时频率

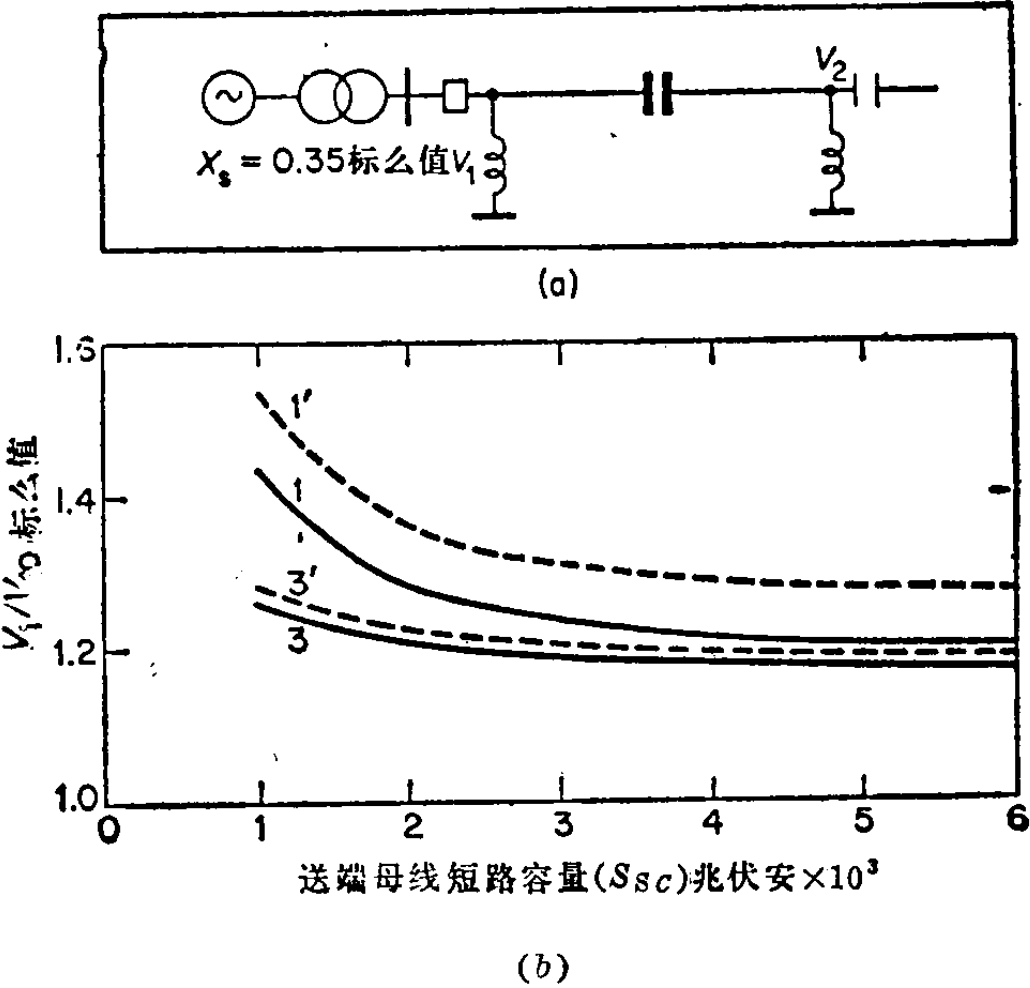


图 2-4 切除负荷

(a) 单线图，(b) 300 公里线路，
 1, 1'—无补偿，
 3, 3'—50% 串联电容和 70% 并联电抗补偿，
 起始电压 $V_{20} = V_{10} = 400$ 千伏 = 1 标么值，