

过电压及其保护

上 册

解 广 潤 著

水 利 电 力 出 版 社

过电压及其保护

上 册

解 广 潤著

水利电力出版社

过电压及其保护

下 册

解 广 润著

水利电力出版社

內 容 提 要

本書是为高等工业学校电机系同学学习“高压工程”和“过电压及其保护”课程而编写的参考书，同时在内容选择上也考虑到现场工作人员的参考需要。

全書分为上下册，共五篇：(一)电磁波的传播；(二)雷电；(三)避雷针线及避雷器；(四)电气设备的防雷保护；(五)内部过电压与电力系统绝缘水平的规定。上册包括緒論，电磁波沿有损耗导线和无损导线的传播，电磁波在变压器绕组和旋转电机绕组中的传播，防雷分析仪，雷电的起源，参数及效应。

过电压及其保护

解 广 润 著

*

1602D457

水利电力出版社出版 (北京西郊科丰路二里路)

北京市书刊出版业营业许可出字第106号

水利电力出版社印刷厂排印 新华书店发行

*

850×1168 $\frac{1}{16}$ 开本 * 6 $\frac{3}{16}$ 印张 * 169千字

1958年12月北京第1版

1958年12月北京第1次印刷(0001—4,100册)

统一书号: 15143·1248 定价(第10类)1.10元

本書是想為各學校电机系同學學習“高电压工程”一課或“过电压及其保护”一課提供一本參考書而寫的。同時在內容選擇上也考慮到現場工作人員的參考需要。

在編寫過程中，著者搜集了數百種參考資料，在大力向蘇聯先進技術學習的基礎上，對於其它國家的有益經驗也充分加以注意。同時著者力求聯系我國電力系統防雷運行經驗的實際加以討論。在若干問題上，著者還提出了某些自己的看法。

應當聲明，本書第一篇（電磁波的傳播）是根據著者為1954年全國防雷訓練班所寫講義修改而成的，而第十一章（發電所對直击雷的保護）是根據著者為1955年全國防雷訓練班所寫講義加以改寫而成的。因此這些部分的內容和該兩分講義中的內容是大致相同的。

本書第九章（避雷器）是陳慈萱同志編寫的。

最後，著者對於哈爾濱工業大學高壓教研室的同志們所提出的很多寶貴意見表示感謝。並且希望讀者賜教，以求改進。

1957年2月

目 录

緒 論	1
-----	---

第一篇 电磁波的傳播

第一章 波沿无损导綫的傳播	4
1-1 波沿无损單导綫的傳播	4
1-2 平面电磁波在空間的傳播	8
1-3 波的折射及反射	11
1-4 彼德遜規則	15
1-5 波通过电感或旁过电容	17
1-6 結点电压的图解法	23
1-7 电磁波作用于振蕩回路	26
1-8 在由一段导綫和电感(或电容)組成的回路中波的过程	30
1-9 无损單导綫时波的过程的全部解答	33
1-10 多次反射	44
1-11 等值波規則	46
1-12 流动波的填表計算法	48
1-13 波在平行多导綫系統中的傳播	51
第二章 电磁波沿着有損耗导綫的傳播	57
2-1 波沿着常参数的有損导綫的傳播	57
2-2 集肤效应对波头的影响	64
2-3 电磁波沿电量导綫流动的情况	70
2-4 波在平行有損多导綫系統中流动的多速理論	83
第三章 电磁波在变压器卷綫中的傳播	94
3-1 一般說明	94
3-2 变压器等值結綫图合閘于直流电源时的情况	95
3-3 任意波形的电压电源作用到变压器卷綫时的情况	106
3-4 綫路波阻及中性点接地方式对卷綫电位分布的影响	111

3-5	波在三相变压器中的傳播	115
3-6	截波作用在变压器上	118
3-7	周期性的电压波作用在变压器上	121
3-8	非共振变压器	123
3-9	电磁波从一个卷綫傳到另一个卷綫	126
第四章	电磁波在旋轉电机卷綫中的傳播	130
4-1	波在电机卷綫中傳播的理論	130
4-2	电磁波在电机卷綫中傳播的實驗数据	135
第五章	波在复杂回路中过程的求解法	138
5-1	防雷分析仪	138

第二篇 雷 电

第六章	雷电的来源	150
6-1	烏云的产生	150
6-2	烏云的起电	153
6-3	雷电的各种形式	158
第七章	雷电的参数及效应	163
7-1	雷电放电的过程	163
7-2	雷电的有关参数	166
7-3	雷閃的分布	184
7-4	感应过电压	186
7-5	雷电的各种效应	197

目 录

第三篇 避雷針(綫)及避雷器

第 八 章 避雷針(綫)及其接綫	205
8-1 避雷針(綫)的保护作用及其确定	205
8-2 單根避雷針(綫)的保护范围	209
8-3 多根避雷針(綫)的保护范围	214
8-4 避雷針(綫)的接地	220
8-5 避雷針的結構	233
第 九 章 避雷器	237
9-1 一般說明	237
9-2 閘型避雷器的工作原理及其特性	237
9-3 閘型避雷器的火花間隙	239
9-4 非綫性电阻元件	245
9-5 閘型避雷器的結構及分类	249
9-6 閘型避雷器的組合	262
9-7 管型避雷器的工作原理及其特性	266
9-8 管型避雷器的伏秒特性	267
9-9 管型避雷器遮断續流的特性	268
9-10 管型避雷器的結構	270
9-11 管型避雷器的使用	273
9-12 反游离閘型避雷器	279

第四篇 电气设备的防雷保护

第 十 章 送电綫路的防雷	281
10-1 对送电綫路防雷的要求	281
10-2 送电綫路絕緣的冲击特性	283
10-3 建弧率	291
10-4 綫路絕緣所受大气过电压	293
10-5 送电綫路的各种防雷措施	309
10-6 154, 200 及 400 千伏綫路的防雷	315
10-7 35~110 千伏綫路的防雷	323
10-8 3~10 千伏綫路的防雷	331

10-9 綫路交叉处的保护	332
第十一章 发变电所对直击雷的保护	335
11-1 发变电所对直击雷的保护	335
第十二章 变电所对进行波的防雷保护	339
12-1 一般要求	339
12-2 变电所絕緣配合的原則	340
12-3 閘型避雷器伏秒特性与被保护絕緣伏秒特性的配合	342
12-4 閘型避雷器伏安特性与被保护絕緣伏秒特性的配合	347
12-5 变电所的进綫保护	352
12-6 变电所的危险波曲綫及耐雷指标	359
12-7 配电系統防雷	376
第十三章 旋轉电机的防雷	380
13-1 旋轉电机防雷的特点及其要求	380
13-2 几种常用的电机防雷方式	386
13-3 变压器对电机的防雷作用	411
13-4 由电机到变压器之間的架空导綫感应过电压的防止	419
13-5 低压旋轉电机的防雷	422

第五篇 内部过电压与电力系统絕緣水平的規定

第十四章 内部过电压	425
14-1 内部过电压的产生	425
14-2 拉开电容負荷所引起的过电压	426
14-3 拉开电感負荷所引起的过电压	436
14-4 由于共振产生的过电压	447
14-5 由于电弧接地产生的过电压	453
14-6 消弧綫圈	462
第十五章 电力系統中性点的接地方式与系統絕緣水平	472
15-1 規定絕緣水平的出发点	472
15-2 中性点接地方式对系統絕緣水平的影响	475
15-3 中性点接地方式的选择	476
15-4 几个名詞的定义以及試驗条件	480
15-5 变电所电器和变压器絕緣水平的規定	481
15-6 送电綫路絕緣水平的規定	487

緒 論

本書討論了電力系統的過電壓保護問題。

所謂過電壓是指使得電氣設備絕緣發生危險的電壓升高而言。

電力系統的過電壓有兩個來源，一個是打雷，一個是電力系統內部的電磁振蕩。前者產生的叫大氣過電壓，后者叫內部過電壓。

雷雲與地之間的電位可達一億伏，其放電電流可達200,000~300,000安。當雷擊於送電綫或其它電氣設備時往往會引起絕緣的破壞。

電力系統的雷害事故是很多的。蘇、美、英、日等國的運行經驗表明，送電綫路事故中大約有50~60%是雷害事故，而某些防雷不善的綫路則幾乎100%都是雷害事故。

我國送電綫路的雷害事故大約占全部重要事故的25%左右。應當指出，我國雷害事故的絕對數字是很大的，因此上述百分數不意味着我國防雷工作的完善，而恰恰相反，它反應出我國電力系統的設備情況及管理水平還存在問題，以致其他各種事故也發生得很多。經過系統防雷工作者的努力，我國電力系統的雷害情況正在逐年減少。

為了避免電氣設備的損壞，對於大氣過電壓要設法避免它的出現，或將它削弱到對絕緣無害的程度。

內部過電壓也能引起系統絕緣的破壞，有時甚至使得整個地區停電。我們的任務主要是保證電力系統的絕緣水平足夠抗得住內部過電壓的作用，其次是在某些方面設法將過電壓加以限制。

我國對雷電現象的觀察研究已經很久了。在3,500年前的殷商甲骨文字中已有“雷”字，在周朝青銅器上已有“電”字。在

尚書及易經兩部古書中曾有关于雷电現象的記載。王充(公元27~107年)在論衡中对雷的本質曾写道：“夫雷，火也”。清初虞兆泽(17世紀)也曾用爆竹为喻来解釋雷声与閃光的关系。清乾隆时紀曉嵐也曾記錄过雷电自地中上升的目睹事实。但是对直击雷保护最有效的方式——采用避雷針是美国富蘭克林和俄罗斯罗蒙諾索夫在18世紀中叶提出来的。避雷針的采用使得建筑物及电气設備对直击雷保护的問题得到了解决。

电力系统防雷的問題包括以下几个部分：(1)对直击雷的保护，(2)对感应雷的保护，(3)对进行波的保护。

随着电力系統的不断發展，电气設備受雷击的机会越来越多，因此对于防雷技術的要求也不断提高。人們在雷害事故的分析中取得了大量的經驗，不断地丰富了关于雷电活动規律的知識。同时由于实验技术与測量儀器的飞跃进步(1914年出现了冲击电压发生器，1898年出现了鉄磁子，1924年出现了电花仪，1927~1928年出现了高压示波器)，使得防雷理論从幼稚的概念性的阶段上升到成熟的能够定量計算的阶段。数十年来电力系统防雷技術方面有着很显著的进步：象对雷电規律及参数的掌握；象避雷針(綫)保护范围的确定；象綫路从针对感应雷保护轉变为针对直击雷保护又轉变到保护直击雷时同时計及感应雷分量的作用；象木絕緣性能的充分利用；象建弧率規律的掌握；象高电阻系数土壤中接地問題的初步解决；象电量在防雷上的作用的确定；象自动重合閘的应用；象避雷器性能的巨大改善；象补偿式耐雷变压器的发明；象絕緣配合原則的改变；象变电所发电厂各种标准保护方式的出現等等。所有这些技術进步使得电力系統の雷害事故大为减少。例如苏联电力系統の雷害程度，1954年只有1934年的1/20。我国东北地区电力系统1954年的雷害事故也下降到1953年的65%。

在防雷技術方面苏联比其它国家要先进得多，例如110及220千伏送电綫路的雷害程度比苏联要严重5倍(当然美国雷电比較强，土壤电阻率比較大，也是雷害事故多的一部分原因)。但是

不論那一个国家在防雷技术上也都有其独到之处，我們不仅要努力学习苏联的防雷技术，同时也要学习一切国家好的經驗。

我国在解放前，电力系统主要是根据比較落后的美国和日本的防雷理論进行防雷的，存在着很多的缺点。例如很多避雷綫很少接地，避雷綫保护角过大，木絕緣被短路，变电所无直击雷保护装置，发电机的进綫保护很差等等。由于雷害事故很多，甚至有些电厂在雷雨时干脆不送电。在解放后我国过电压保护工作人员，根据苏联的过电压保护导則进行了一系列的防雷改善工程，并且大力培訓了干部。同时气象部門和电力部門分别进行了雷电观测，撫順电瓷厂制成了特性相当良好的閘型避雷器，技改局和沈阳高压开关厂制成了管型避雷器，机电研究所制成了瞬变分析仪，并应用来研究变压器中波的过程，哈尔滨工业大学制成了防雷分析仪，并与电业部門合作分析了某些变电所的防雷情况。电力部設計院对于鋼筋混凝土杆木横担的防雷效能进行了研究。这些工作意味着我国防雷工作者向科学进军的良好开端。

我国有很多情况和苏联不同，例如雷电活动很强烈，很多电气设备的絕緣較陈旧，有着大量的直接配电的电机，不少地区的土壤电阻率特別大，鋼材也比較缺乏等。因此在我国下列問題的研究有着特殊的意义：例如雷电参数的观测，土壤电阻率大的地区中的接地問題，110~150千伏系統中性点接地方式的問題，旋轉电机的防雷問題，取消避雷綫的可能性的問題等。本書也力求在这方面作一初步探討。

随着电力系统額定电压的提高，內部过电压的問題越来越变得严重起来，这是因为內部过电压的值大致和系統的額定电压成正比的緣故。在110千伏及其以上的系統中，內部过电压对于系統絕緣水平的選擇起着重大的作用。在絕緣不良或断路器性能不好的电网中也往往由于內部过电压产生重大的事故。因此如何限制內部过电压的幅值并使絕緣水平与之相适应有着很大的經濟意义。我国电力工业部沈阳中心試驗所对于高压系統的內部过电压問題正在开展一系列的研究工作。

第一篇 电磁波的傳播

在研究过电压的問題时，会經常碰到电磁波傳播的过程。深入掌握电磁波傳播的規律对过电压保护工作者來說大有必要，因此本篇可以說是过电压保护的基础知識。

第一章 波沿无損导綫的傳播

1-1 波沿无損單导綫的傳播

我們来研究一下当图 1-1 的开关 K 突然合上时电压电流在导綫上的分布。

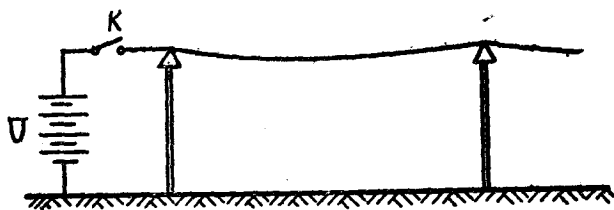


图 1-1 直流电压合閘到輸电綫上去

首先我們可以看到导綫的电感將有阻止电荷向右移动的趨勢，而导綫对地的电容將使向右移动的电荷有一部分停留下来，所以在关上开关时，并不是全部导綫的电位立即升高到 U ，而是由左向右逐点使导綫电位升高。

为了使問題簡化，我們假設的是完全的导体，在地中不可能有电力綫或变化的磁力綫存在，因之地的影响可以按鏡象法用另一根导綫来代替。同时我們忽略导綫电阻及对地漏电电导的影响，只考虑綫路的电感及电容。于是图 1-1 的等值回路將如图 1-2 所示。从磁場的观点来看，图 1-2 中 $L'dx$ 的作用相当于磁力綫的作

用，而 $C'dx$ 的作用相当于电力线的作用 (L' 及 C' 分别为线路单位长度的电感和电容)。由图1-2可以看出，从电压的观点可以列出下列方程式：

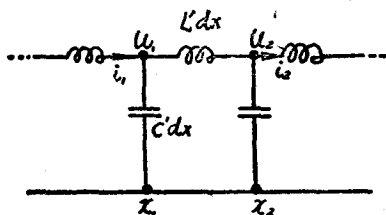


图1-2 输电线的等值回路中的一个元件

$$U_2 - U_1 = -L'dx \frac{\partial i}{\partial t},$$

$$\therefore \frac{\partial U}{\partial x} = -L' \frac{\partial i}{\partial t}. \quad (1-1)$$

而从电流的观点可以列出下列方程式：

$$i_1 - i_2 = C'dx \frac{\partial U}{\partial t},$$

$$\therefore \frac{\partial i}{\partial x} = -C' \frac{\partial U}{\partial t}. \quad (1-2)$$

式中

$$C' = \frac{2\pi \Sigma}{\ln \frac{2h}{a}}, \quad (1-3)$$

$$L' = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{2h}{a}, \quad (1-4)$$

而 h 及 a 分别为导线离地高度及半径。由于不计导线电阻，所以导线的内感为零， L' 只是导线外电感。

假定 $U = Zi$ ，由 (1-1) (1-2) 两式就可以定出 Z 的值来，因为将 $U = Zi$ 代入 (1-1) (1-2) 两式之后得到：

$$Z \frac{\partial i}{\partial x} = -L' \frac{\partial i}{\partial t}, \quad (1-5)$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -C' Z \frac{\partial i}{\partial t}. \quad (1-6)$$

将 (1-5) 式除 (1-6) 式即可得出：

$$Z = \pm \sqrt{\frac{L'}{C'}}. \quad (1-7)$$

因为 Z 代表波的电压和电流的关系，所以叫做线路的波阻。

$$\frac{U}{i} = Z = \pm \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad \text{一式又可改写为 } \frac{1}{2} L' i^2 = \frac{1}{2} C' U^2, \quad \text{它}$$

的物理意义是沿输电綫單位長度空間中儲藏的磁能 $\left(\frac{1}{2} L' i^2\right)$ 恰好等于單位長度空間中儲藏的电能 $\left(\frac{1}{2} C' U^2\right)$ 。

由(1-1)(1-2)兩式对 U 联解, 得出:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = L' C' \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \quad (1-8)$$

令 $v = \frac{1}{\sqrt{L' C'}}$, 所以(1-8)可改写成:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}. \quad (1-9)$$

运用运算微积法, 即令 $\frac{d}{dt} = p$, $\frac{d^2}{dt^2} = p^2$, 于是(1-9)式变为

$$\frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial x^2} = \frac{p^2}{v^2} \bar{U}. \quad (1-10)$$

將上式对 x 积分可得到:

$$\bar{u} = \bar{u}_v e^{-\frac{p \cdot x}{v}} + \bar{u}_r e^{+\frac{p \cdot x}{v}}, \quad (1-11)$$

式中 $\bar{u}_v$ 及 $\bar{u}_r$ 只是 p 的函数, 而与 x 无关。

由运算微积法的延迟定理, 我們知道:

$$\bar{\varphi}(p) e^{-p t_0} = \bar{\varphi}(t - t_0).$$

所以(1-11)式的解式为:

$$u = u_v \left(t - \frac{x}{v} \right) + u_r \left(t + \frac{x}{v} \right). \quad (1-12)$$

u_v , u_r 函数的具体形状要由边界条件和起始条件来决定。

由(1-12)式可以看出: 电压包括 u_v 及 u_r 兩部分; u_v 部分电

压波为 $\left(t - \frac{x}{v} \right)$ 的函数, 在 u_v 电压波上的任一点 a , 电压的值是

固定的, 在時間由 t_1 变到 t_2 时, a 点在导綫上的位置已經移动, 要在导綫上找出相当的 a 点必須滿足:

$$t - \frac{x}{v} = \text{常数}. \quad (1-13)$$

將 (1-11) 式微分, 得到 $\frac{dx}{dt} = v$. (1-14)

也就是說 $u_i(t - \frac{x}{v})$ 代表一个以速度 v 向着 x 的正方向行进的波。

同理, 我們可以看出 $u_r(t + \frac{x}{v})$ 代表一个以速度 v 向着 x 的負方向行进的波。 u_v

叫做前行波, u_r

叫做反行波。这

兩個波在运动时

都保持着原来的

形狀 (图 1-3)。

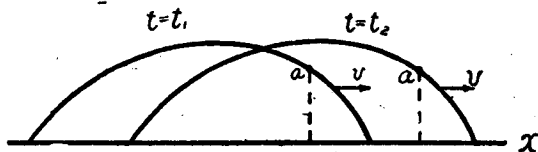


图 1-3

將 (1-3) 及 (1-4) 式代入 $v = \frac{1}{\sqrt{L'C'}}$ 中, 不难求出:

$$v = \frac{1}{\sqrt{L'C'}} = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} = 3 \times 10^{10} \text{ 厘米/秒} = \text{空气中的光速}.$$

可見 u_v 及 u_r 兩個波都是以光速行进的。

由 (1-1) 和 (1-2) 式还可以做 (1-10) 式得到

$$i = i_v(t - \frac{x}{v}) + i_r(t + \frac{x}{v}). \quad (1-15)$$

將 (1-12), (1-15) 及 (1-5) 式代入 (1-1) 式可以看出:

(1-5) 式 $Z = \pm \sqrt{\frac{L'}{C'}}$ 中 “+” 和 “-” 号分别相当于前行波及反行波的情形, 即:

$$e_v = \sqrt{\frac{L'}{C'}} i_v = Z i_v, \quad (1-16)$$

$$e_r = -\sqrt{\frac{L'}{C'}} i_r = -Z i_r. \quad (1-17)$$

負号代表: 当反行波的电压(电荷)为正时, 由于电荷运动的方向是向着 x 軸的負方向, 所以所形成的电流是負的电流(电流

向着 x 軸的正方向流动时才是正的电流)。

方程式(1-12), (1-15), (1-16)及(1-17)是电磁波沿导线扩散的基本规律, 由这四个规律再加上边界条件及起始条件, 我们就可以处理各种具体问题。

没有电量时架空线的波阻大约为 $Z=500$ 欧, 而电缆的波阻大约为 $Z=10\sim50$ 欧。电磁波在电缆里面传播的速度大约为空气中光速的一半。

練習題1: 图 1-4 中相反运动的兩波会不会互相中和而消灭?

練習題2: 图 1-5 中的前行波波尾部分电压越来越低, 波頂附近的电荷会不会倒流向波尾?

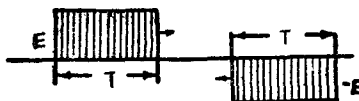


图 1-4

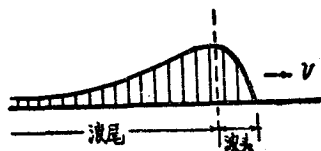


图 1-5

1-2 平面电磁波在空间的传播

在上一节中我们已经从“电路”的观点来讨论了波沿着导线流动的过程, 现在我们从电磁波在空间传播的观念来讨论它。

已知介质的介电常数为 ϵ , 而导磁系数为 μ , 假设这一介质被

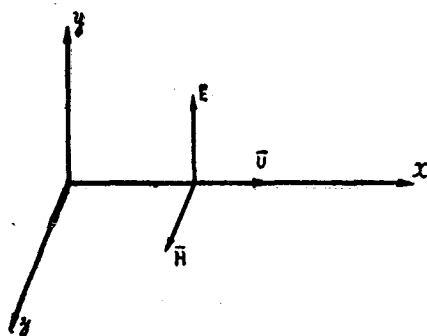


图 1-6

某平面分成二部分, 在该平面的一侧没有电场, 而在另一侧充满着均匀的电场 (电磁强度为 E , 磁场强度为 H)。此外, 我们假设磁力线和电力线互相垂直, 并且它们都和上述的分界面互相平行。于是馬克士威方程式可以