

中央人民政府燃料工業部

義講班習講電氣

第二冊

中央人民政府燃料工業部
技術研究室編

燃料工業出版社

中央人民政府燃料工業部

義講班習講電氣

第 二 冊

中央人民政府燃料工業部
技 術 研 究 室 編

燃 料 工 業 出 版 社

一九五三年五月・北京

電 氣 講 習 班 講 義
第 二 冊

中央人民政府燃料工業部
技 術 研 究 室 編

燃料工業出版社（北京東長安街中央燃料工業部內）出版
新華書店總經售

校對：鄭雪笑 李三錫

書號：50-2*25開本*共161頁116,500字*定價：13,000元

一九五三年一月北京第一版

一九五三年一月北京第一次印刷 一九五三年五月北京第二次印刷

印數：10,001—1,5000冊

版權所有・不許翻印

編 者 的 話

一、本書是中央人民政府燃料工業部於一九五一年七月在北京開辦的電氣講習班第一期的講義提綱。這個班的教程和主講是蘇聯專家主持的；中國工程師配合着作些專題報告。參加學習的同學都是全國各電廠的工程人員和先進工人，共計六十餘人。

二、講義的內容主要是針對目前我國電廠和電力網中存在的容易發生而以往作得不够的技術問題。

三、本書原為講授形式的資料，在原講習班共講授約兩個半月，其中包括專題報告、學員提問題和專家解答問題的時間在內。這些資料的介紹方法對於具有一般文化的參加實際工作的技術人員和工人是切合實際需要並易於接受的。

四、這個講義經過整理以後，按照內容的類別分為五冊出版：

第一冊包括同期發電機運行和檢修工作中的問題；

第二冊包括過電壓、防雷保護設備、絕緣配合等問題。絕緣試驗方法也列入本冊裏；

第三冊包括電力系統的繼電保護裝置和自動裝置等在工作中應注意的問題；

第四冊包括發電設備的保護裝置在工作中應注意的問題；

第五冊包括短路電流的計算問題。

五、本冊中「操作過電壓」及「避雷器及其試驗」兩篇係蘇聯專家所講，本部辦公廳編譯室同志翻譯。其餘各篇則為本室工程師根據專家材料及自己搜集之材料編寫而成。

六、本書出版時仍保留了原來講義的形式，因此，各篇中敘述有關問題時，可能爲引述的必要而發生重複的地方；每篇所用的專名詞未必盡同，雖盡量修正，或恐仍有遺漏；熱烈希望讀者發現問題時，函寄我室，以便幫助他們改正。

中央人民政府燃料工業部技術研究室

一九五二年五月

目 錄

編者的話	1
過電壓概述	5
第一節 外過電壓	5
第二節 內過電壓	12
第三節 衝擊波	18
操作過電壓	28
第一節 概 述	28
第二節 中性點不接地的系統當發生某相接地時 所產生之電弧過電壓	29
第三節 當切斷長距離線路時所產生之過電壓	35
第四節 切斷電感時所產生之過電壓	36
轉動機器的防雷保護	38
第一節 轉動機器需要特殊保護裝置之理由	38
第二節 並聯電容器	40
第三節 我國現有實例與計算	44
變電所的防雷保護	51
第一節 變電所防雷的目的	51
第二節 變電所防雷的正確策略	51
第三節 變電所防雷工作必須掌握的要點	51
第四節 變電所內可能受到的雷電電壓	52
第五節 線路絕緣限制了導線上的雷電電壓	52
第六節 衝擊波的衰減和變形	53
第七節 線路閃絡與變電所閃絡的關係	56
第八節 架空地線上的直接落雷	58
第九節 變電所的絕緣配合	59

第十節	安裝避雷器的基本要求——距離與位置 對保護效率的影響	60
第十一節	直接落雷的保護	66
第十二節	變電所的防雷保護設備	68
第十三節	變電所防雷問題的總結	71
避雷器及其試驗		73
第一章	閘型避雷器定期絕緣試驗暫行規程	73
第一節	通則	73
第二節	設計現代避雷器所採用的基本原理	74
第三節	避雷器之基本特性及配合電力網方式之 校驗方法	75
第四節	閘型避雷器的伏安特性曲線	77
第五節	各種避雷器試驗之實際問題	79
第二章	避雷器及其試驗	82
第一節	概論	82
第二節	管型避雷器	83
第三節	閘型避雷器	87
第四節	電壓恢復與避雷器的關係	88
第五節	蘇聯製造的閘型避雷器類型	89
絕緣配合		96
第一節	導言	96
第二節	基本衝擊絕緣水準	96
第三節	衝擊試驗	97
第四節	系統之絕緣配合	102
第五節	結論	113
電力設備的絕緣試驗方法		114
第一節	絕緣電阻與洩漏電流的測量	114
第二節	交流電場下的介質損失的測量	128
第三節	按電容檢查絕緣潮度	144
第四節	送電線路不良磁瓶檢查法	155

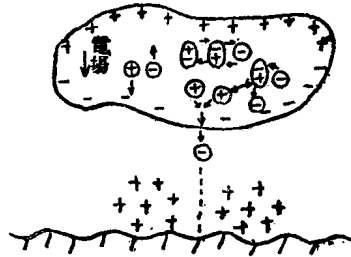
過電壓概述

第一節 外過電壓

一、雷雲及其放電機構

(1)威爾遜雷雲說：根據威爾遜氏的研究，普通在晴天的大氣內，電場強度向大地方向為 100 伏/公尺。當有雷雲的時候，電場強度極大，但由於空氣的絕緣破壞而

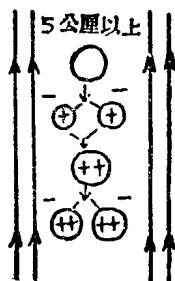
變為火花放電，所以對大地的電位梯度也有一定的限度，最高的時候可達 100 千伏/公尺。在此強電場的雷雲內，存在有電離子，其移行速度為 3 公尺/秒。同時水滴受重力作用也向下方降落。據威



氏研究，直徑 0.1 公厘的水滴降落速度恰為 3 公尺/秒，所以直徑大於 0.1 公厘的水滴能夠超過正離子的向下移行速度而向大地降落。另一方面水滴有分極作用，即上部帶負電，下部帶正電，所以下部與正離子相斥而吸引負離子，結果水滴便帶負電。雲為水滴之集結，故其下部便積蓄負電荷。又由於小水滴受氣流作用上昇，故雲之上部便帶正電荷，如第一圖所示。落下之雨為帶負電荷者，但在落下之途中與大氣中所有的正離子相結合，所以結果又形成正電荷之雨。

(2)辛普遜雷雲說：根據辛普遜氏研究，地表上的大氣層中，距地愈高氣溫愈低，其關係約為 $6^{\circ}\text{C}/\text{公里}$ 。若地表上由於輻射作用

具有高溫時，則與該處附近地帶的溫度失去平衡，可能產生含有多量濕度的上昇氣流。此氣流遇冷變成水滴，結至相當大時則下降。依據他的研究，直徑 5 公厘的水滴落速不超過 8 公尺/秒；若遇有 8 公尺/秒以上的上昇氣流，則不能下落。當水滴直徑大於 5 公厘時，則在下落途中由於相關速度而被分裂，此時水滴帶正電荷，氣流帶負電荷。



第二圖 雷雲結構圖

此被上昇氣流所推移而分裂的正電荷水滴，能互相結合而又下降，如第二圖所示，此下降的水滴便反覆地積蓄正電荷。同時上昇氣流將帶負電荷的水滴推逐至雷雲的上部或後部，所以在落雨時，在不同的地帶可能有帶正負兩種電荷的雨。

(3) 雷雲放電機構

不論任何雷雲學說，均說明雷雲為帶有大量電荷的水滴所構成。因雷雲範圍甚大，由於靜電作用，在水滴與空氣的摩擦作用中，逐漸積蓄電荷；根據實際研究結果，證明其為十數庫倫乃至百數十庫倫。其放電情形，是由電位梯度最大部分先行破壞，呈電離狀態，移行至相鄰部分，而造成閃電路。

根據勘測結果，現在關於雷雲公認的數值為：雷雲的厚度為 2—8 公里，寬度為 8—12 公里，長度為 40—80 公里，其移行速度為 40 公里/小時。

研究雷雲放電機構，多利用博愛斯照像機所攝出的各種自然環境內的現象；經長時期研究，將所得結果加以統計與分析，得知每次落雷為多次電光（亦即繼續發生的雷擊）所重合而成，每次落雷的雷擊數為 1 至 40 次，平均為 4 次。各次雷擊所發生的時間間隔為 0.006—0.53 秒，平均為 0.03 秒。第一次雷擊的光亮最強，有樹枝

狀分歧，平均爲 4 分歧。其後的雷擊均在第一雷擊發生分歧處再度發生分歧，但是分歧數量可能較少。

雷擊之開始爲先驅放電，即將空氣電離而形成放電的通路，此通路謂之閃電路。先驅放電是由雲向大地進行的，其平均速度爲 7×10^8 公分/秒，呈現爲階段式。當此先驅放電抵達大地時，立刻依循其放電通路發生由大地向雷雲的主放電。主放電光輝極強，速度也快，平均約爲 6×10^9 公分/秒，爲先驅放電速度的十倍左右。

二、閃電路的衝擊阻抗

當發生雷擊時，空氣受破壞成爲導電狀態，在其放電通路之附近造成靜電場及磁場。如此可知閃電路必有一定的衝擊阻抗，其數值直接影響雷擊電流值。

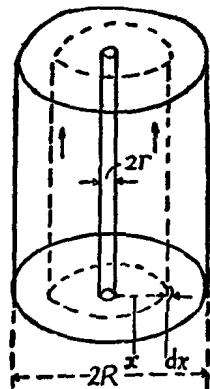
因閃電路爲鋸齒形，故不易計算其衝擊阻抗。今設雷擊爲對大地垂直方向進行，如第三圖所示，並設雷雲爲圓盤狀，其半徑爲 R ，閃電路半徑爲 r ，

則可設： $R = 500$ 公尺

$r = 0.3$ 公尺

更設閃電路位於雷雲之中心，對大地間爲圓筒形的通路，電荷即在其中移動，因此由雷雲所產生電場亦隨之變動。此時可考慮有與放電電流相等的變位電流，其流通方向與放電電流相反，且在半徑 R 的面積內，並在雷雲的正下方分佈爲均勻狀態，如此則可求得單位長度的電感。

在閃電路內部所生磁通與該電流鎖交所生電感，與導線內的情況相同，以電磁單位表之，爲 $1/2$ 。然後求閃電路外部的磁通所生



第三圖
計算閃電路衝擊
阻抗之說明圖

電感。一般在軸線有單位電流通過時，與它相距 x 之點，其磁場強度為 $2/x$ 。但是此時距軸線 x 距離內所流通的電流，為閃電路所流通的單位電流與此距離內所含變位電流之差，如上述變位電流均勻分佈於半徑 R 的面積之內，其總和與軸線內所流通的放電電流相等，僅方向相反，則半徑 x 的面積內電流之總和為：

$$1 - \frac{\pi x^2}{\pi R^2} = 1 - \frac{x^2}{R^2}$$

所以在距軸線為 x 及為 $(x+dx)$ 之兩距離間所通過的磁通與其內部電流的鎖交數為：

$$\frac{2}{x} \left(1 - \frac{x^2}{R^2}\right) dx$$

閃電路外部的總鎖交數為由下限 r 至上限 R 間之積分值，所以閃電路的全部電感為：

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{2} + \int_r^R \frac{2}{x} \left(1 - \frac{x^2}{R^2}\right) dx \\ &= \frac{1}{2} + 2 \int_r^R \left(\frac{1}{x} - \frac{x}{R^2}\right) dx \\ &= \frac{1}{2} + 2 \left(\log_e x - \frac{x^2}{2R^2} \right)_r^R \\ &= \frac{1}{2} + 2 \left(\log_e \frac{R}{r} - \frac{1}{2} + \frac{r^2}{2R^2} \right) \end{aligned}$$

但 $R \gg r$,

故 $L \cong 2 \left(\log_e \frac{R}{r} - \frac{1}{2} \right)$ 電磁單位

$$= 2 \left(\log_e \frac{R}{r} - \frac{1}{2} \right) \times 10^{-9} \text{ 亨}$$

其次爲求閃電路的靜電電容，僅考慮閃電路外部鎖交磁束所生電感，則有下列關係：

$$CL = \frac{1}{V^2} = \frac{1}{(3 \times 10^{10})^2}; \text{ 但 } V \text{ 爲衝擊波的進行速度, 與光的速度相同,}$$

$$\begin{aligned} \therefore C &= \frac{1}{V^2 L} = \frac{1}{9 \times 10^{20} \times 2 \left(\log_e \frac{R}{r} - \frac{1}{2} \right)} \text{ 電磁單位} \\ &= \frac{1}{9 \times 10^{11} \times 2 \left(\log_e \frac{R}{r} - \frac{1}{2} \right)} \text{ 法} \end{aligned}$$

如此可求得閃電路的衝擊阻抗爲：

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{L/C} = \sqrt{9 \times 2^2 \left(\log_e \frac{R}{r} - \frac{1}{2} \right)^2 \times 10^2} \\ &= 60 \left(\log_e \frac{R}{r} - \frac{1}{2} \right) \text{ 歐} \end{aligned}$$

將上述假設 R 、 r 數值代入，則：

$$\begin{aligned} Z &= 60 \left(\log_e \frac{500}{0.3} - \frac{1}{2} \right) = 60 (2.3 \times 3.2218 - 0.5) \\ &= 415 \text{ 歐} \end{aligned}$$

如此求得閃電路的衝擊阻抗與普通線路的衝擊阻抗差不多相同，但是實際上閃電路爲鋸齒狀，且有樹枝狀分歧，所以可能較此值小些。並且在上述計算中曾假設變位電流爲集中均勻分佈，而實際上愈接近大地，則電場分佈愈比較擴散，即在接近大地時靜電電容較大，故閃電路的衝擊阻抗即漸減少。

三、感應雷

當在線路的上方有雷雲時，由於靜電感應，則在其下方的線路上即可發生相反極性的電荷；在距其甚遠的兩端，即接近線路終端附近，發生相同極性的電荷。因雷雲發生甚緩，其充電時間一般約

雷數分鐘，並且線路對大地並非完全絕緣，因此線路兩端的電荷逐漸向大地洩漏，結果僅有在雷雲正下方的電荷殘留在線路上，成為所謂束縛電荷，如此使線路的電位保持定常狀態。今若另有一個相反極性的雷雲與此原來的雷雲發生放電，或者對大地或其他對象直接放電，而原雷雲的電荷消滅時，則在線路上的束縛電荷失掉原來造成靜電場之關係而殘留於線路上，其電位與在放電發生以前由雷雲所生電位相等而極性相反，此即謂之感應雷。

設 h —線路的有效高度

g —電位梯度

則 線路上感應之電位 $E = g \cdot h$

但是束縛電荷在雷雲放電之後即不能停留於線路上，立刻變成進行波向左右兩方各移行一半，故此進行波的尖峰值 $E' = \frac{1}{2} g \cdot h$ 。

此處所謂有效高度 h ，一般即可認為是線路在地表上的高度，但是在乾燥、砂礫或山地地帶，若其接地電阻甚高時，則此 h 值可能比較實際地表上的高度尚高些。至於電位梯度的數值，各學者主張不甚一致，有認為在 170—250 千伏/公尺者，亦有認為是 300 千伏/公尺者，但一般在計算中可採取 200 千伏/公尺之數值。

另外，雷雲的放電並非在瞬間即行終了，實際上與大地間之放電需要相當時間。依雷雲學說，雷雲的電荷是存在於每個水滴的表面，即電荷實際是浸透在雷雲的極深部，其放電亦與普通的靜電電容器有所不同，而為由電位梯度最大部分先行將空氣破壞而放電，此電離狀態逐漸轉移到相鄰部分，所以到完全放電為止需要經過相當的時間。

如此由雷雲之放電開始，同時束縛電荷逐漸移動一部分，電荷之分佈亦逐漸變化，電位亦隨之減低。所以上述二式必須乘以一個

由雷雲放電時間與電荷分佈所決定之因數 α ，大致取作小於 1.0 之值。如此電壓進行波尖峰值之公式即變為：

$$E' = \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot g \cdot h = q \cdot g \cdot h$$

此綜合因數 q 必小於 0.5。

若線路上有架空地線保護時，須再乘以一個由架空地線與導線之排列情況所決定的保護比 ω ，此 $\omega \leq 0.5$ ，公式即變為：

$$E' = q \cdot \omega \cdot g \cdot h$$

例：今有線路高度為 20 公尺，則感應雷電壓為：

$$E = g \cdot h = 200 \times 20 = 4,000 \text{ 千伏}$$

進行波尖峰值 $E' = q \cdot g \cdot h$

$$= 0.45 \cdot g \cdot h = 1,800 \text{ 千伏}$$

若有架空地線時， $E' = q \cdot \omega \cdot g \cdot h = 1,800 \times 0.5$

$$= 900 \text{ 千伏}$$

若接地電阻雖大但不超過 50 歐時，對此數值可無影響。

四、直 擊 雷

雷雲的電荷直接與線路上的電荷放電時，謂之直擊雷，即普通所謂落雷。因雷雲電荷極大，衝擊電壓與放電電流均極大，可能達數億伏與數十萬安之值，必然損毀設備。而線路上的衝擊電壓一般由絕緣子閃絡放電而受限制，即所考慮的進行波認為等於絕緣子的閃絡電壓值。同時直擊雷多落於架空地線或鐵塔上，由於衝擊放電電流大量經過，與架空地線或鐵塔的接地電阻形成極高的電壓，作用於架空地線或鐵塔與線路導線之間，即由絕緣子所承受；此種落雷即所謂之反擊雷。由於絕緣子閃絡放電所形成的進行波一般具有極其陡峻的波尾，可能比直擊雷更為厲害。此時電壓之公式如下：

$$E_s = K \cdot I \cdot R$$

式中 K ——由鐵塔與地線架設情況所決定的常數，普通取作

$$K=0.8$$

I ——放電電流

R ——塔脚接地電阻

雷雲放電電流之數值依理論推測，固然可能為 600—700 千安，但由於架空地線及鐵塔等分流，每鐵塔平均最大電流不致超過 250 千安，又為防止反擊雷的電壓過大，縮小塔脚接地電阻的數值是極為重要的。

例： $K=0.8$

$$I=250 \text{ 千安}$$

$$R=10 \text{ 歐}$$

$$\begin{aligned} \text{則直擊雷所造成電壓 } E_s &= 0.8 \times 250,000 \times 10 \\ &= 2,000 \text{ 千伏} \end{aligned}$$

所以對於直擊雷而言，若在地質條件不佳的地區，為了取得甚低的接地電阻，必須特別設法，如埋設地線等。

第二節 內過電壓

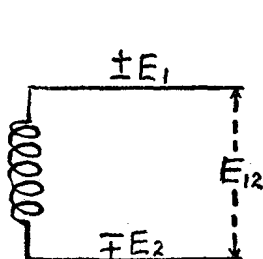
內過電壓之現象與理論均頗為複雜，今僅簡單的解說之。內過電壓除由於電力網操作、變動等使電路情況變化因而發生者外，多由外界之影響所招致之系統內之故障所產生。例如由於雷之直擊、感應等原因使電力系統內發生過電壓；或由風雪之作用，鳥類或其他外物之接觸，機器本身之自然劣化，以及維護欠佳等等原因，以致使導線之絕緣子閃絡放電及破損等，亦可能由於導線與地線之接觸或斷線等故而產生過電壓；皆其基本原因。

內過電壓又直接與電力系統中性點接地狀態有關。中性點直接

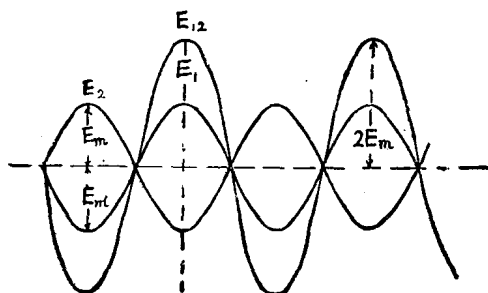
接地或低電阻接地一般不易招致甚危險之電弧接地故障。電抗接地是保護電力系統設備不使發生電弧接地故障者，自不待言；高電阻接地或不接地的電力系統，因接地故障點之電流主要為對大地之充電電流，故最易成為電弧接地之故障，而發生較高之過電壓。

一、平衡單相不接地系統上之電弧接地過電壓

為簡便計，考慮此種情況時，將對稱二相線路通稱為平衡單相二線式不接地線路，上方1號線對大地之電位差為 $\pm E_1$ ，2號線者為



第四圖 平衡單相二線式不接地系統等價回路圖



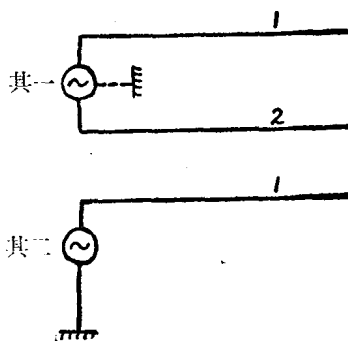
第五圖 第四圖之線間電壓波形圖

$\mp E_2$ ，如第四圖及第五圖所示。因其各瞬間絕對值相等，可知 $|E_1| = |E_2| = E$ 。在本線路上，1、2兩線間之電位差即其線間電壓為 E_{12} 時，則：

$$E_{12} = \pm (|E_1| + |E_2|) = \pm 2E$$

設由於上述某種原因，在2號線上某點發生接地，在暫不考慮線路之波阻時， E_2 立即變為零電位， E_1 升高到相當於 E_{12} 之電位，如第六圖中由其一轉變到其二之情況，此即為其一線接地時之電位變化。

若此接地點距電源甚遠，或在



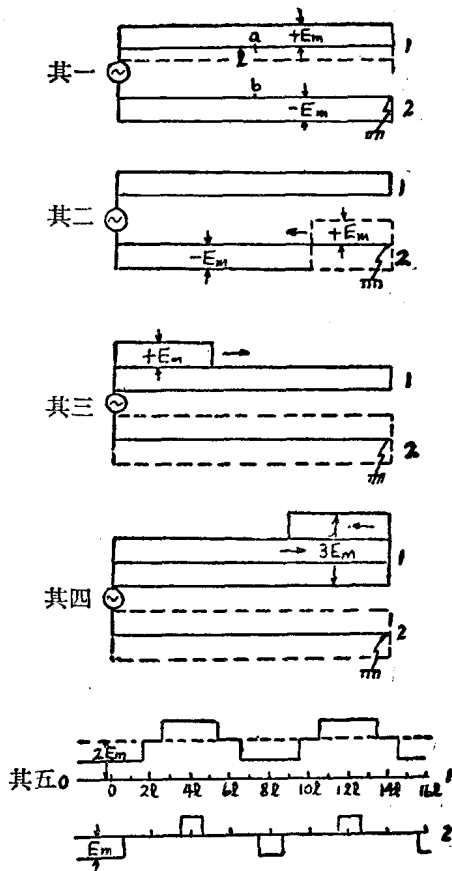
第六圖 當第四圖中發生一線接地故障時之等價回路圖

受電端附近時，且接地發生於 $B_2 = -E_m$ 之瞬間，則其瞬電現象如第七圖所示。

如不考慮二線間之相互作用，且設線路為理想的無損失電路（即 $R = G = 0$ ），則圖內其一所示 2 號線發生金屬接地之瞬刻情形中，僅該點之電位為零；此零電位以線路傳播速度 $S = (L_0 C_0)^{-1/2}$ 向左方傳播，謂之放電波。觀察此零電位點之傳播，可用對於進行波之另一觀念論之。在接地發生後之當時，兩線仍然分別保持 $+E_m$ 及 $-E_m$ 之電位，但在該瞬間有 $+E_m$ 之矩形進行波（謂之充電波），由接地點以傳播速度 S 向左方傳播。第七圖中其二所示即為表示在 2 號線

上有 $+E_m$ 之進行波正由接地點向左方電源側進行中之情形，由此可知充電波經過後之部分所具的電位即逐漸變成零電位點。

充電波之發生，可解釋為由於線路上殘留電荷之重疊方法所造成。根據重疊定理，可以說這種現象是由以下二種狀態共同造成者：



第七圖 當第四圖中發生一線接地故障時之瞬電現象圖