

送電綫路防雷設計

劉 繼 編 譯

東北工業出版社出版

1 9 5 2 年

送電綫路防雷設計

劉 繼 編 譯

東北工業出版社出版

1 9 5 2 年

送電線路防雷設計

編 譯 者	劉
出 版 者	工 業 出 版 社
印 刷 者	工 教 印 刷 廠
出版日期	1952 年 11 月
定 價	6,000 元

3,000册

編 者 序

本書主要是根據蘇聯1949年出版的「大氣超電壓與高壓設備的防雷」及蘇聯最近三年（1950—52）的「電氣」，「發電廠」兩雜誌中有關論文八九篇編譯而成，並由德文「發電廠與電力網」一書內採取了一些補充材料。此外，又加入一部份編者的見解，和對美國及日本綽路防雷理論的批判。編者對於該項專門技術缺乏研究，編譯時間又很短促，不妥之處，恐將難免，希望讀者隨時提出意見，以便再版時修正。

本書可供設計人員和一般電氣技術人員參考，並可作為大學或專科學校電機系輸配電課程的補充教材和參考書籍。

本書曾由毛鶴年總工程師在工作繁忙之餘，給以校閱，在譯文方面則由魏文甲同志作了校核。在此特向兩位同志致以衷心的謝意。

劉 繼

1952年10月瀋陽東北電業管理局

代 序

本書係劉機同志在研究送電線防雷問題中，由蘇聯書籍及雜誌選擇有關文獻編譯而成，將防雷問題的先進技術作有系統的敘述。其中很多是以前從未考慮的或是認為不能解決的問題，例如，建弧率問題及用對數函數的公式解決避雷線遮蔽效果與保護角的關係等。

目前在送電線路防雷設計上存在着很多嚴重問題，以致約佔線路總投資百分之十左右的避雷線不能起它應有的作用，甚至完全失去作用。而關於此問題的專門書籍，國內迄未曾出版，英美書籍率多語焉不詳，不能解決實際問題。因此，本書的出版，正可滿足設計上的需要，這對於大規模建設即將開始的今天，是有重大意義的。

毛 茹 年

1952年10月 瀋陽

目 錄

代序 (毛鶴年)

編者序

1. 緒 論	1
2. 基本的防雷裝置	4
3. 耐雷水平與耐雷指標	8
4. 裝有避雷線的輸電線路	16
5. 充分利用木絕緣的線路	25
6. 消弧線圈保護作用的應用	43
7. 線路自動重合閘的保護作用	52
8. 應用管型避雷器以保護線路	53
9. 聯合(組合)式的線路防雷方式	56
10. 從運行記錄中分析和 比較各種線路防雷方式的耐雷性	61
11. 目前我國送電線防雷設計中 存在的問題及其解決辦法	71
文 獻	83
附錄 俄中術語對照表	34

送電綫路防雷設計

1. 緒 論

爲了得到不間斷的供電和高壓設備的正確運行，在電氣設備導電部份本身之間或導電部份與大地之間，需要具有足夠的和可靠的絕緣。

在電力網的正常運行時，帶電部份的絕緣，係處在近於系統的相電壓之下，這時，電機及變壓器線圈絕緣所受的電壓是不大的。然而，有時由於各種原因，在高壓設備的這些部份可能發生電壓昇高的現象，以致引起絕緣電氣強度的部份破壞或全部破壞。以後凡電壓超過正常數值，我們都認爲是超電壓現象。

因爲絕緣可能受到超電壓的衝擊，所以高壓設備絕緣的電氣強度需要具有某些富裕。所需安全係數之值，部份決定於絕緣本身的性質（如在機械和電的作用下的均一性和穩定性，對運行中受污和老化的可能性等），而主要決定於運行過程中可能出現的超電壓現象。

因爲關於放電問題的術語常常不够明確，所以把本書中所用的某些術語確定如下：

擊穿——在介體中，使介體失去絕緣性之導路的發展過程；

閃絡——是表面的擊穿，即沿着兩介體間分界表面部份發生擊穿的現象；

放電——兩種電荷經過導路的中和過程；

預放電時間——電荷在介體中放電開始前的預放電過程所需之時間；

絕緣的電氣強度——不使絕緣發生擊穿和閃絡現象的最大（極限）電壓。

絕緣的閃絡或擊穿並非即刻發生，其發展至終了需要相當的過程，絕緣間隙在極大的超電壓下發展到閃絡或擊穿約需數微秒。

秒至十幾微秒的時間；而在工業週率超電壓下，堅固的介體發展到熱擊穿或表面潮濕及污穢的絕緣子發展到閃絡，需要零點幾秒至十幾分鐘的時間；至於高壓變壓器的主絕緣，由於絕緣的加速老化，在不大的過電壓下，發展到絕緣擊穿的地步，甚至需要經過數小時之久。

選擇高壓設備絕緣的一般原則為：

一、在系統可能發生長時間超電壓條件下能有足夠的耐久性和適當電氣強度；

二、在短時間超電壓下能有足夠的電氣強度。

由於各個系統的特殊性，絕緣耐久性的意義也就不同。例如在使用消弧線圈的系統中，就可能發生長時間的工業週率超電壓。又如當系統一相接地時，其餘兩相的絕緣將承受系統的線電壓，即其電壓升高 $\sqrt{3}$ 倍。當線路换位不完全時，即使在系統正常運行的情形下，導線電壓也能升高很多；在絕緣子污穢和潮濕的情形下，使用消弧線圈的系統的實際運轉經驗證明，超電壓常常引起絕緣子的閃絡（即所謂「日出時事故」）。

在中性點直接接地的系統中，單相短路，突然切斷負荷以及其他情形可能發生工業週率電壓的升高。然而通常這種超電壓的數值是較小的，且為時亦較為短促。所以在中性點直接接地的系統中，引起危險的長時間電壓的機會是很少的，只是在多雲和污穢的地區才有這種情形。

短時間超電壓，按照其發生的原因可分為下列幾類：

由於雷電時大氣放電的作用，使電氣設備上產生大氣或雷電超電壓，或稱為外部超電壓。從觀察證明，這種超電壓現象發生於當雷直擊線路（或變電所）時，同樣也發生於當線路附近的雷雲之間或雷雲至大地之間產生放電現象時。當雷直擊於線路時，超電壓數值很大，甚至電氣設備上所受的電壓以雷電本身的高電壓計算。當線路附近發生雷雲放電時，在導線上發生感應的超電壓，但與直擊雷相較，其數值較小，對高壓設備之危險性也較少。所以近代的線路防雷理論不復以感應雷為防護對象，而是以直擊雷為設計的基礎。

內部超電壓是由於電力系統中內部電磁能量的振盪所引起的，通常是由於系統的短路故障，開關操作（個別部份的合閘或跳閘，短路以及電路斷線等），結線或其他部份的變更等原因而發生的。由於「操作」這一字不僅解釋為開關的開閉，亦可廣義解釋為系統結線或個別部份的變更，因此內部超電壓也常被稱為操作超電壓。

這些事實說明電力系統的設計和運行，在選擇高壓設備的絕緣強度時，超電壓現象具有決定性的影響。

高壓（110—220千伏）的現代機器設備，通常試驗電壓約為正常運行電壓的3.5—4倍。在低壓（3—10千伏）設備，安全係數通常達到運行電壓的10—15倍。

各種型式絕緣物的容積和價格，以及與之相關聯的附加費用的增加，約與試驗電壓成正比，而在某些種類的電氣設備，甚至與試驗電壓的二次方或高次方成正比，可見加強電氣設備的絕緣，將大大增加設備的價格。現代工廠製造的電氣設備，能保證有很高的電氣強度，並能忍受長時間的操作超電壓。然而就是這樣完善的絕緣，也不能忍受最危險的大氣超電壓。

從郊外線路的運行證明，在個別情況下，雷電流的振幅能超過200,000安。當雷直擊於導線時，將發生具有成百萬伏振幅的短時間（衝擊）超電壓，這對於任何絕緣都不可避免地要引起破壞。在每個雷雨季內，通常每100公里綫路要受到數十次的雷擊。如果不作特殊的防雷裝置，幾乎每次雷擊都將引起綫路的切斷。所以綫路防雷裝置，在獲得不間斷的供電上，具有極其重要的意義，但必然要增加綫路的建造費用。至於旋轉電機及變電所內的設備，防雷裝置的重要性也不亞於送電綫，因為擊穿絕緣將引起設備長時間停止運行和修理。

蘇聯、美國和英國電力系統的統計數字均證明，在所有系統正常運行破壞的情況中，有50—60%是由於大氣超電壓所致，而在防雷設備不完善的情況下，因雷電引起的停電事故幾佔100%，蘇聯某一220千伏送電綫路（無防雷裝置）的運行經驗更明確地證明了這一點。該綫路在7年中的67個雷電日內，發生了87次雷電切斷事

故，而非雷電事故僅有 3 次（計斷落的氣球牽引線將導線短路，懸式線夾脫落，和絕緣子破壞各一次）。

在所有 400 千伏及其以下的現代化架空送電線路，雖然在電氣強度上已有很高的安全係數，但大氣超電壓仍能造成很大的危險。所以送電線路要達到安全和不間斷的運行，沒有適當的防雷措施是不可能的。研究大氣超電壓發生的起因，特性和數值，以及對其防護的方法，能够確定和降低絕緣電氣強度的安全係數，和提高電力系統正常運行的不間斷性與安全性，並能降低送電線的建造和運行費用。

2. 基本的防雷裝置

關於大氣超電壓保護的理論和實踐，已在短期內有了長足的進步。這裏不準備詳述防雷裝置的發展歷史，只將其發展的幾個基本階段簡述如下：

第一階段（1914 年以前） 防雷技術僅以雷擊的自然特性和大氣超電壓的發生條件為基礎。假定由於雷直擊線路（認為這種現象極為稀少）而引起絕緣子破壞是無法避免的，因而送電線的防雷裝置，只是考慮到雷電發生於線路附近時，導線上引起的靜電荷及感應的超電壓。

懸垂式絕緣子的製造，獲得了防止高壓絕緣老化的方法。絕緣的高壓試驗開始採用衝擊電壓。

送電線以架於桿塔頂部的避雷線保護，變電所則以各種不可靠的避雷器和電抗器保護。這樣雖提高了線路的絕緣水平，但因變電所設備的絕緣較低，因此某些故障就發生在變電所內。

第二階段（1914—1930 年） 測定快速交變電氣過程的新儀器出現後，藉這種儀器的幫助，獲得了一系列關於自然雷及電波在線路與變壓器線捲上傳播的真實數據。利用新的經驗數據產生了新的理論。這種理論確定了大氣放電的形成條件，大氣超電壓的數值，以及電波在線路與變壓器上傳播和電波變形的條件。

然而即使在這一階段的末期，防雷的觀點仍只限於對感應雷的

保護。認為雷直接擊線路的可能性極小，且對於這種直接擊於桿塔，避雷線或線路導線的雷擊所發生的局部超電壓，使絕緣發生閃絡的現象，以為是無法避免的。對於較低的感應超電壓則採用靠近導線的避雷線來保護。這種觀點，當時在一定程度上是正確的，因為大部分的送電線只有很短的長度和不高的電壓。

至二十年代後期，實際線路的運行記錄證明，大多數的感應超電壓不超過100—200千伏，這對於35千伏及其以上的線路絕緣並無任何危險。在這一時期內，由於線路較長，其遭受的直接雷較之電壓不高長度不大的線路增加很多。

變電所對來自線路之衝擊電波的保護與以前相同，仍採用不可靠的避雷器和電抗器，而這些設備本身常成為產生事故的原因。

第三階段（1930—1940年） 許多研究材料公佈後，認為對直接雷的保護是需要的，而且也是可能的；這在防雷問題的觀點上是一個轉折點。這種觀點得到了一致的承認，並為35千伏及其以上的線路之實踐所證實。感應超電壓只有在設計3—10千伏電氣設備的防雷裝置時才被考慮。與此同時，絕緣改善了，高壓設備的放電電壓及試驗電壓提高了，可靠的避雷器也出現了。避雷線架設於塔桿之上，且塔桿具有很好的接地線。絕緣的伏秒特性，即放電電壓與預放電時間的關係也已確定，又累積了很多雷電流的數據，同時也得出了計算超電壓的方法。

第四階段（1940年至現在） 在這--階段中廣泛採用各種特殊的方法以提高防雷的可靠性（三相或單相自動重合閘等），大量採用保護（管型）避雷器，以及改善避雷器的特性等。同時超電壓的計算方法也日益精確，對絕緣和避雷器的特性，雷電流的振幅與陡度以及其他特性等也有初步的研究，而且又將運行經驗進行了分析和總結。這樣就相當地提高了電力系統防雷的可靠性，大大地減少了雷雨季中每100公里線路的切斷次數（約減少十倍）。

但與此同時，增加了電網總長度，因而雷擊總數也隨之增加了。目前很大一部份線路的事務和系統正常運行的破壞是由於雷電放電的結果。所以防雷問題不僅不失去其現實意義，而且對於系統

運行的可靠性和不間斷性更有密切的關係，因此防雷問題，在高壓技術中佔着首要的地位。

在設計送電線路時，須根據送電線需要的可靠程度，該區域內雷電作用的強度，線路的構造，電壓的高低，中性點是否接地以及其他的因素，來適當的採用各種防雷設備。現代高壓設備的防雷問題，基本上可分為下列幾方面：

一、對直擊雷的保護 這種保護裝置是將避雷針按裝在高壓設備之上。如果裝設了足夠數目的避雷針，且對保護對象具有足夠的高度，則幾乎所有的雷擊都可避免；而在無避雷針時，這些雷擊就將落到導線或設備上，引起超電壓現象，並將絕緣擊穿。

爲了保護集中的設備（例如發電所），通常是在鐵構上按裝避雷針，或按裝獨立的避雷針。對於分散的設備（例如送電線或大變電所）的保護，這種方法費用太大。在這種情形下，廣泛採用避雷線，避雷線裝於桿塔的導線上，距導線有足夠的高度。

運行經驗及對模型的研宄均證明，避雷線或避雷針，能使導線或設備的着雷機會減低到千分之幾至萬分之幾。

二、對二次閃絡的保護 當雷擊於避雷線時，雷擊點的電壓常達到數百萬伏特的數值，這樣高的超電壓實際上會使任何絕緣發生閃絡。所以只按設避雷線並不能使送電線達到防雷的可靠性。爲防止二次閃絡，需要在很短的路徑內將雷電流從避雷線引至大地，並且需要裝設接地電阻很低的接地線。所以在雷電區域的高壓線路（154—400千伏）和110千伏的鐵塔線路，以及重要性較大之35千伏的鐵塔線路，使用避雷線已經成爲一個規定。然而在線路的每個桿塔上裝設低於5—10歐姆的接地線，這在建造費用上是不經濟的，同時在雷電流爲100—200千安時將發生500—2000千伏的電壓降。所以按照設備的額定電壓及其對可靠性的要求，有時藉助於一系列的補助方法以防止二次閃絡，如：加強絕緣和按裝管型避雷器等。

35千伏及其以下的變電所，由於防止二次閃絡的緣故，通常採用獨立的避雷針，使其離被保護的導線具有足夠的距離，並敷設獨立的接地網。

三、對進行波的保護 當雷擊導線或當雷擊桿塔而發生二次閃絡時（或發生感應超電壓時），所產生的超電壓即以進行波的形式沿線路按光速向遠方傳播。

高壓線路具有很完全的絕緣，導線的直徑很大，電阻很低，所以在進行波傳播十多公里之後，仍舊具有相當高的電壓振幅，能使線路上個別絕緣較弱的地方發生閃絡。因此，在這些地點應當裝設管型避雷器，以便防止線路絕緣由於進行波而發生閃絡現象。

四、對發生電弧的保護 近來研究的結果證明，並非所有的絕緣衝擊閃絡都會建立起穩定的電弧。在大多數情況下，這種閃絡能夠自行熄滅，不致引起線路的切斷和閃絡絕緣的破壞。例如，在中性點經過消弧線圈接地的系統和長度不大的中性點絕緣的系統中，大部份的接地短路不致發生穩定的電弧。所以，在很多的情況下，使用消弧線圈是很有效的防雷方法。

在蘇聯，110千伏及其以下的線路，廣泛使用大線距（長木橫担）的木桿。所用的木材相當地提高了線路絕緣的衝擊強度。此外，這種線路的運行經驗證明，由於沿木材及絕緣子的衝擊閃絡途徑很長，不致建立起能發生線間短路的穩定電弧，這就顯著地減少了線路的切斷次數。

五、對用戶正常運行破壞的保護 短時間（幾分之一秒）切斷電源不致引起電動機的停止和電機的失步，特別是在只切斷一相，用戶的其餘兩相仍能送電50—60%時，對於用戶的影響更小。在線路切斷之後，電弧熄滅，絕緣即很快地恢復至原來的電氣強度，並且線路可以重新帶壓合閘。所以近來廣泛採用三相和單相自動重合閘及其他方法以提高供電的不間斷性。

六、對絕緣破壞的保護 許多絕緣物，如空氣間隙及瓷絕緣子等，能忍受多次閃絡而不致引起傷損和破壞。所以，如果選擇空氣間隙與避雷器等絕緣特性，以便將閃絡引導至絕緣危險性最小的地方（即實行合理的特性配合），那麼，就能相當地減小絕緣損傷的危險性。可見在變電所中，各種設備電氣強度高低的次序應當是：避雷器最低，其次是空氣間隙，瓷絕緣子，油間隙，電力變壓器的

內部絕緣以及其他設備。電氣強度最高的應當是表用變成器（特別是電流互感器）的絕緣，因為後者僅能在其他設備中得到選擇性的跳開。各種絕緣物的伏秒特性具有不同的形式，並且是相當分散，進行波在變電所的各個不同點發生不同的超電壓。所以，在各個特性之間，選擇合理的間隔——絕緣配合——是有着重大的意義的。

線路瓷絕緣子的衝擊閃絡，特別是在波頭具有極大的陡度時，能使絕緣子的邊緣或裙的突起處發生破裂。強大電流的電弧能引起瓷表面的熔化。線路絕緣子的保護附件和線路的快速動作跳開（0.00—0.25秒）能夠預防或相當地減低這種現象。

要解決上述問題，即具體選擇高壓設備最適當的防雷裝置並估計其可靠性，是有相當困難的。某些現象，如雷的理論等，至今仍缺乏研究，對於這些問題還不能以方程式表示。因此，我們在後面各節中，均採用公認的假說，利用近似值和經驗公式以討論防雷裝置的各項具體問題。

3. 耐雷水平與耐雷指標

送電線路通常採用由多種防雷裝置所構成的各種綜合的防雷方法。為了估計各種防雷設備的效能，並相互比較，先解釋下列各術語的意義。

耐雷水平 耐雷水平可理解為直擊於線路一定部份具有特定波形（例如斜角波頭及無限波尾）的最大計算電流，在這一電流值內，線路絕緣仍不致發生閃絡。防雷設計中各個參數改變時，（例如桿塔的接地電阻），根據耐雷水平，即可比較其對二次閃絡保護效果的影響。

耐雷技術指標 耐雷技術指標係表明設備不發生雷電事故正常運行可能的年數，並可用以比較各種防雷設備，包括消弧線圈，自動電合閘等的技術效能，本書內所謂耐雷指標，係以100公里長之線路及20雷電日為基準，亦即為單位停電次數（每100公里線路，在20雷電日下停電的次數）的倒數。

經濟的耐雷性 過高要求線路的耐雷性雖然事故次數減少，但

線路投資過大，所以也不一定經濟。所謂經濟的耐雷性即此項防雷方式，其年費用總和為最小。計算建造費及計算因保護不完善所引起的損失，按照經濟的耐雷性條件能決定採用何種防雷裝置能得到最經濟的和最適當的效果。年消耗費用總和可表之如下：

$$P_s = P_s(n_0) = P_{om} + P_{rp}$$

式中 $P_{om} = n_0 p_0$ —— 由於雷擊停電所引起的費用損失；
 n_0 —— 可能的雷擊停電次數（耐雷指標 m 的倒數）；
 p_0 —— 停電一次的費用損失；
 $P_{rp} = P_{rp}(n_0)$ —— 年運行費用及防雷裝置的折舊費。

經濟的耐雷性可利用微分法由下列條件求出（圖 1）：

$$\left. \frac{\partial P_s}{\partial n_0} \right|_{n_0 = n_c} = 0 = p_0 + \left. \frac{\partial P_{rp}}{\partial n_0} \right|_{n_0 = n_c}$$

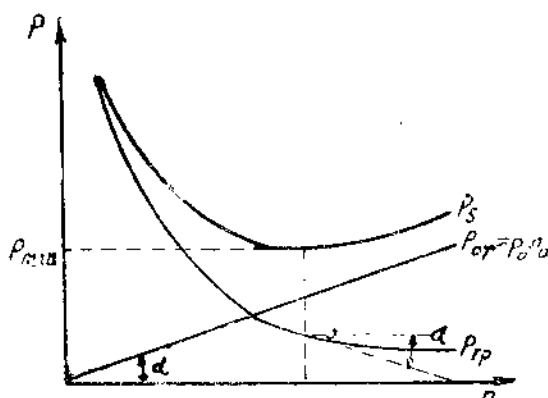


圖 1. $\tan \alpha = p_0 = - \left. \frac{\partial P_{rp}}{\partial n_0} \right|_{n_0 = n_c}$

為了求得設計上經濟的結果，必須知道線路每停電一次的損失，估計損失時，要考慮線路的型式，可能的預備設備及用戶的可能損失等等。特別應當注意的是用戶的直接和間接損失。這一數字常是很大的，在人民的國家應當將用戶損失（例如影響生產和破壞

設備如煉鋼爐等等)作統一考慮,過去常有人只考慮電業局少送電量作為計算停電損失的依據,這是不對的,因為後者與用戶損失相較要小得多。

由於沒有關於每停電一次所引起的損失之數據,現在估計經濟的耐雷性還是很困難的。停電一次的損失與輸送的電力 $Q(\text{MW})$ 及每 1MW 的電費 r_0 成比例,其公式如下:

$$P_0 = r_0 \cdot Q$$

若防雷設計已得到最經濟的方案,則可取一些線路當作典型,算出 $P_{TP} = P_{TP}(n_0)$, n_0 , P_0 及 r_0 。然後就可將所求得的 r_0 應用到其他型式的線路上去。

經濟的耐雷性標準在理論上是很完整的,然而在其實際應用上到現在為止還缺乏足夠的原始數據。當然,為得到科學而經濟的防雷設計,上述經濟的耐雷性法則還急待發展。因而今後各種有關方面的統計,特別是各種線路每停電一次的損失(包括用戶損失在內)的統計,在這一問題上將具有重大意義。不過現在我們在考慮線路的防雷設計時仍將只限於估計其耐雷指標及耐雷水平,因此應對下列條件進行研究,如線路雷擊總數,雷擊計算電流之或然率,穿過避雷線雷擊導線的或然率,及經過衝擊閃絡發生電弧的或然率(建弧率)等。

計算中所用之公式^{(1) (2) (3) (4)}本書關於各種防雷設備的比較計算,係基於下列各經驗公式:

運算雷電流的或然率

$$\phi_1\% = 100e^{-0.01I_0} \text{ 或 } \lg(\phi_1\%) = 2 - \frac{I_0}{60} \quad (1)$$

式中, $\phi_1\%$ —當運算雷電流大於或等於 $(I_0 \text{ 千安})$ 時的或然率。

公式(1)係由圖2(文獻1)中的雷電流曲線所算出者,該曲線得自 ТВН ЛПИ 實驗室。從表1可看出按公式(1)算出之或然率,較1946年蘇聯國家動力書籍出版局出版之「過電壓保護導則」(已有中譯本)中規定者為小[文獻6*]。近年來對雷電流分析的結果,始得到這一新的公式。

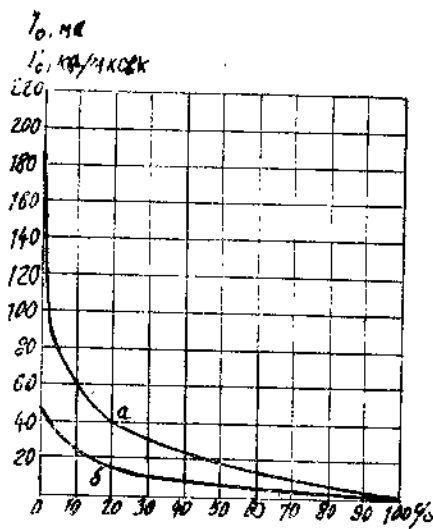


圖 2 雷電流曲線 a—振幅 b—陡度

線路着雷次數 在20雷電日，每100公里線路上之着雷次數為：

- 註： (1) Д. В. ШИШМАН, Грозовые поражения линий 110 и 3-кв НА Деревянных опорах без троса, электрические станции No3, стр11, 1941
- (2) М. В. Костенко, Д. В. Шисман, Анализ грозовой поражаемости электрических сетей, электрические станции No2, стр, 32, 1948
- (3) В. В. Бургсдорф, А. И. Торшенигор, Э. М. Магдсон, Анализ грозовых поражений и отключений в 1946 г. электрические станции No5, стр. 40, 1947
- (4) ВВ Бургсдорф, Исследование грозозащиты энергосистем, электричество, No2, стр21, 1949

*「過電流保護導則」中計算雷電流或然率公式為

$$\lg(\phi\%) = 2 - \frac{I_0}{90}$$

以後凡註有文獻者係指譯者之參考書籍，列於本書末，而原作者之參考書籍作註解，列入每頁下部。