

中央人民政府高等教育部推薦
高等學校教材試用本

電力輸送學

А. М. ЗАЛЕССКИЙ 著

孫 繼 祖 譯



龍 門 聯 合 書 局

中央人民政府高等教育部
高等學校教材試用本



電力輸送學

A. M. 薩列斯斯基著

孫繼祖譯 鍾兆璠校

龍門聯合書局

本書係根據蘇聯動力出版社 (Государственное энергетическое издательство) 出版的薩列斯基教授 (А. М. Залесский) 著“電力輸送學” (Передача электрической энергии) 1948 年版譯出。原書經蘇聯高等教育部審定為高等工業學校教學參考書。

本書由孫繼祖翻譯。孫繼祖原任天津大學電機系副教授，現已故世。本書並經鍾兆璣校訂。

電力輸送學

ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

А. М. Залесский 著

孫繼祖譯

鍾兆璣校

★版權所有★

龍門聯合書局出版

上海南京東路61號101室

中國圖書發行公司總經售

啓智印刷廠印刷

上海自忠路239弄28號

1954年1月初版 印0001—5000冊

定價¥20,000

上海市書刊出版業營業許可證出029號

中央人民政府高等教育部推薦 高等學校教材試用本的說明

充分學習蘇聯的先進經驗，根據國家建設需要，設置專業，培養幹部，是全國高等學校院系調整後的一項重大工作。在我國高等學校裏，按照所設置的專業試用蘇聯教材，而不再使用以英美資產階級教育內容為基礎的教材，是進一步改革教學內容和提高教學質量的正確方向。

一九五二年九月二十四日人民日報社論已經指出：‘蘇聯各種專業的教學計劃和教材，基本上對我們是適用的。它是真正科學的和密切聯系實際的。至於與中國實際結合的問題，則可在今後教學實踐中逐漸求得解決。’我們現在就是本着這種認識來組織人力，依照需要的緩急，有計劃地大量翻譯蘇聯高等學校的各科教材，並將陸續向全國推薦，作為現階段我國高等學校教材的試用本。

我們希望：使用這一試用本及今後由我們繼續推薦的每一種試用本的教師和同學們，特別是各有關教研組的同志們，在教學過程中，對譯本的內容和譯文廣泛地認真地提出修正意見，作為該書再版時的參考。我們並希望各有關教研組在此基礎上逐步加以改進，使能結合中國實際，最後能編出完全適合我國需要的新教材來。

中央人民政府高等教育部

高等學校(中等技術學校)教材試用本

讀者意見表

書名	電力輸送學
對本書內容的意見	
對譯本的意見	
教學中的問題	

刊正表

(包括翻譯錯誤及排印錯誤)

頁	行	字	刊誤的字句	應如何改正?
其他錯誤				

讀者姓名		學校或 工作機關		年級或 擔任職務	
詳細 通信地址					

本表如不敷填寫,可另紙書寫,連同本表,逕寄中央高等教育部
教學指導司教材編審處。

序

本書是作者根據多年在列寧格勒加里寧工業大學電機系講授電力輸送的講義加以稍許擴充而寫成的。

在本書中作者擬將輸電設備的敷設問題、發熱的計算、工程經濟的計算、以及電路的計算作一系統的陳述。在敘述這些輸電設備及其構成單元的計算問題時，是注意到了數學上的相當嚴密的要求的，祇有對於超遠距離的輸電才用近似的方法。不過這裏還是舉了些精確解題的例。對於同步機運轉的穩度問題，只作了粗略的討論，因為這個問題對於本書僅具有次要的意義。

本書的敘述次序在可能範圍內是依“歷史”作根據的，換言之，材料的排列是依輸電技術的發展歷史為序的。

本書以緒論開始，繼之以輸電發展簡史，其中特別着重輸電技術在各時期遇到的主要問題，然後述及現代的架空輸電線設備。

在研究輸電線各元件的性能的時候，作者對於集膚作用的問題作了一些必要的、較詳的說明，因為在有關輸電的書籍中這個問題一般是不討論的，然而在輸送距離和輸送功率增大以後，須要用的導線截面往往使集膚作用無法忽略不計。

關於架空線和地下線的電感和電容的問題，作者是藉應用於三相線馬克斯威方程式之助來解答的，認為關於單相線的問題的解法讀者已在電工原理課程中學習過，勿庸再述。這種解法對於架空線已經是足夠嚴格，使我們能說明包括該問題的所有細節，這種細節在其他書中往往不加說明，甚至未提到過（譬如說“工作電感”和“工作電容”的概念以及導線電感電容式中虛數項的作用的概念）。

在討論按能量損耗計算輸電設備的一章中作者對於架空線生熱的問題，捨棄了以往在這方面常使用的經驗公式而採用了邊層理論。

在討論按電壓降計算輸電設備的時候，作者對於主要的實際情形作了輸電方程式的精確的解答。雖然運算必須用複式，作者提供的這些問題的解法却使未知量（電壓、有功和無功功率等等）化成很少的幾個實數。所以作者對於我國以及許多外國著作中常介紹的許多所謂輸送線的電路“近似計算法”很抱懷疑的態度。電路近似計算問題的合理解法是利用諾謨圖（номограммы）。這種諾謨圖是最簡單的近似解法。

按運轉穩度計算輸電設備的這一章必須包括在書內，因為現在已經不可能不用穩度的觀點來研究超長途的輸送線的運行問題。在這一章裏只能對於穩度的理論作簡單的說明因為這問題另有專書來詳細討論。

在超長途的輸送線的運行這一章裏，我們還附帶研究輸送線參數補償的問題。不過對這一問題須有專書來作詳細的討論。

所有的討論都是用的合理化單位制，即 $MKS\mu_0$ 制。

作者對高列夫（А. А. Горев）教授致深切的謝意。他的意見對於作者計劃本書的內容幫助很大，而且本書的最重要的一章——第三章——的計算方法是根據他的著作編寫的。

作者採用了已故烏爾夫（А. А. Вульф）教授的許多意見和著作，尤其是在編寫第四第五兩章的時候。

А. М. 查列斯基

目 錄

序

第一章 輸電設備發展簡史及其現代裝置..... 1

1. 電力輸送在國民經濟上的意義	1
2. 輸電技術發展簡史	4
3. 直流輸電	18
4. 輸電設備的一般電路	24
5. 輸電線的種類	27
6. 架空線的設備。導線	29
7. 夾子	33
8. 金屬附件	38
9. 支柱	43
10. 間距	61
11. 路線	66
12. 輸電設備各元件的性能。導線的電阻	67
13. 導線電感	78
14. 導線電容	89
15. 導線間的電導	101
16. 變壓器常數	104

第二章 輸電設備能耗的計算111

17. 計算的一般原理	111
18. 選擇線路電壓	111
19. 選擇導線材料和構造	114
20. 求導線的最適當的截面。線電流的均方根值	116
21. 選擇輸電線的迴路數	130
22. 線路的基本參數（電壓、導線材料及截面積、迴路數）的整體選擇	131
23. 導線的發熱和架空線的許可電流	135

第三章 輸電設備電壓降的計算	143
24. 計算的一般根據	143
25. 輸電設備各元件的和全部的繼電方程式。等值電路的應用	144
26. 輸電方程式解法。主要問題	170
27. 第一問題	173
28. 第二問題	199
29. 第三問題	200
30. 第四問題	215
31. 第五問題	227
32. 輸電設備供電用電兩端電壓間角度與功率和耗損的關係的求法	237
33. 並聯分路計算法	247
34. 線路的近似計算	259
第四章 按運行穩度計算輸電設備	271
35. 同步電機轉子的運動方程式及其在穩定狀態下運行時的研究	271
36. 同步電機在不穩定狀態下的運行	276
37. 為長線所繫的電機的運行穩度	291
38. 提高穩度的方法	296
第五章 特長線路的運行特點	304
39. 輸電方程式係數隨線路長度的變化。線路的自然功率	304
40. 輸送距離對於穩度的影響	316
41. 負載去掉時電壓的突增	319
42. 四分之一波長和半波長距離的輸電	330
43. 線路參數的補償	337
附錄	371
參考書	401

第一章

輸電設備發展簡史及其現代裝置

1. 電力輸送在國民經濟上的意義

在電工設備的發展初期，電力是直接在使用電地區的附近（工廠、不大的城鎮、大都市的一區）生產的。動力的來源大部份就是運來的燃料——煤和石油。輸電工程的發展，打破了發電地點和使用電地區之間的這種聯繫，使甚至距用戶地區很遠的動力也可得到利用。這種情形在國民經濟上有着重大的意義。事實上，在一國境內的動力來源和動力的集中消費的地區往往是不一致的。譬如說，水力集中在江河的流域，特別在水位差最大的地方。熱力則集中在有煤、泥炭、石油等礦床和有可燃氣體噴出的地區。大的用電戶往往也是集中在這些地方的。但比這更常遇到的情形是用電者集中的地區距離能源很遠。例如，大的工廠或整個工業區建設在富有工業原料（鐵礦、銅礦等）的地方，但在這些地方卻沒有豐富的動力來源。許多大的工業都市因為歷史的關係建立在動力來源並不豐富的地區。因此，我們時常看到動力來源所在地點和動力消費集中地區相隔甚遠的情形。遠距離電力輸送（輸電）能將這兩者聯繫起來。因為有了輸電，所以距消費中心的地區很遠的動力也可以獲得利用，若無輸電，則這將不可能。電力輸送使有可能在富有原料但附近沒有相當的動力來源的地方建設和發展工業中心。簡單地說來，因為有了輸電，所以我們能夠在國土之內有計劃地配置工業地區，而可以在很大的程度上不受動力能源的分佈情形的影響。但我們必須預先說明，在大多數的情形下，工廠為了工作不但需要電能還需熱能。熱能不能作遠距離輸送的，因而大的工業中心時常要求在工廠的附近有相當大量的熱能的生產。

因輸電的發展而產生的重要結果之一是下等燃料（例如，泥煤、煙煤、頁岩等等）的熱能獲得了利用的可能。這些燃料在經濟上說不值得（有時候在物理上甚至不可能）運送到很遠的地方去，因而必須把這些燃料在採得的當地用掉。若它們的產區距離用動力的中心地區很遠，則最經濟的辦法是先利用它們來發電，然後輸送到消費地區去，在某些情形下可利用氣化法。

必須指出，最貴重的燃料像煤和石油也都大部份被不合理地用作發電廠的燃料了。實在這些燃料是可以在別的方面作更有利的利用的：煤可以應用於化學工業和金屬冶煉工業，石油可以提煉成汽油、煤油、滑潤油以及一些別的成分。

所以，即使在出產煤和石油的地方也常常以利用自遠處例如從水電站輸送來的電能較為合算。

在蘇維埃社會主義共和國聯盟境內有很多的具體實例可以證明上面的理論。以烏拉爾地區為例：烏拉爾地區包括有廣大的、富有有用礦產的地方，然而如果不把巴什基里亞共和國的石油礦區計算在內（因為用石油來生產電力，如上所述，是不合理的），則僅在其南部（車路賓斯克煤）和北部（喀馬河的水電和吉茲羅夫斯基煤）有相當強大的動力來源。因此，就不得不以距離幾百公里的動力源泉作據點，來供應這廣大地區的用電。當然，要完成這個供電系統就要作遠距離的電力輸送。

頓巴斯是另外一個例。在頓巴斯這樣產煤豐富的地區，似乎不會特別需要遠距離的輸電。然而實際並不如此。並不是頓巴斯全區都是煤礦區。在頓巴斯的北部和東北部富有各種礦產，需要大量的電力，但是這些地區距離產煤的中心區都有幾百公里。除此之外，還有很多的地區則因為缺乏冷凝器所需循環水的來源，想建設大規模的發電站也很困難。

這樣看來，在這種地方仍以採用較遠距離的輸電為合算。

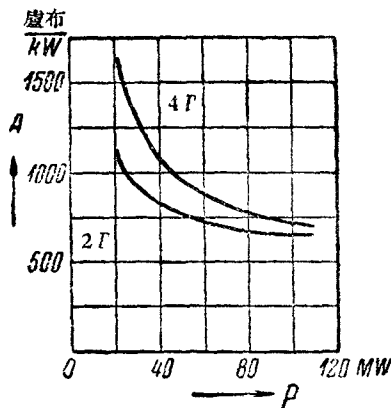
利用水力必須要利用遠距離輸電是很顯然的，但在利用高級燃料時（煤和石油）是否仍要利用遠距離輸電就不容易說了。這一個問題

當然是要從國民經濟的觀點來看，利用鐵路運輸燃料而在消費電力的地區設廠究竟是否容易與有利。這問題經過反復的研究，結果得一法則是：運輸燃料並就地設廠只有在電力消費中心區和獲得燃料的地區距離很遠（約幾千公里）的情形下才比輸電有利。反之，若電力消費中心區和獲得燃料的地區不很遠，則仍是輸電有利。

最後我們再說一說，在動力源泉集中的地區可以很便利地實行大規模的集中發電、然後利用輸電線輸送到用電的中心區在國民經濟上有怎樣重大的意義。

這種集中有大的經濟利益，因為增加電站的容量和所裝發電機的容量會減少電站的比價。

第1圖表示的是火力發電站每一裝置瓦的費用和電站容量間的關係；水力發電廠也有類似的情形。第1圖很清楚地指明用大的電站合



第1圖

理地集中發電最為有利。如發電中心區和用電地區不在一起，則輸電就成為必需。應當指出，有些情形（譬如，大的電站每次發生故障時會有較大的功率損失，等等）要使大量集中發電的利益減少。這些情形已經在聯共第十八次代表大會，關於蘇聯第三個國民經濟五年計劃的

決議中反映出來，這一決議指出必須停止增設特大的發電站而儘量發展中型（25 百萬瓦以下）的發電站。

2. 輸電技術發展簡史

電力輸送的開始可以追溯至十九世紀的八十年代。第一個從理論方面證明了遠距離輸電的可能性的是俄羅斯工程師拉齊諾夫（Д. А. Лачинов）。在 1880 年出版的“電氣”雜誌上，載有他的論文“電氣機械的功能”，他在這篇論文中證明，在輸送一定的功率時，若將電機的轉速或其線捲匝數作相當的增加，則電路電阻的增加不致降低設備的效率。增加電機的轉速或線捲匝數就是增加電機的電壓。據此，他推如下述結論：“能量可以輸送得很遠而經濟損失可以很小”。

1882 年德波里（Депре）裝設了 57 公里長的輸電線。該線把密士巴赫的一個小水電站的電能輸送到明奧博覽會。在密士巴赫裝了一架直流發電機，其電壓為 1343 伏。在明奧電壓等於 850 伏。電能是用兩條直徑 4.5 毫米的鐵導線來輸送的。輸送的功率是 0.25 馬力，效率等於 60%。

這個設備雖然規模很小，但在電工技術方面起了很大作用，並為其開闢了新的發展前途。

在恩格斯給柏恩施坦的著名的信件中對此發展前途已有預言：

“德波里的發現，即運用很高的電壓可以把電流順着簡單的電報線輸送到至今尚未有過的遠距離，而在終點應用——這事現在還只是萌芽——使工業幾乎完全不受任何地域限制，並使甚至最偏遠的地方的水力也能夠利用。如果這發現起始雖將只在都市中利用，最後它將在消滅都市和鄉村的對立上成為強有力的槓桿。但是，與此同時，生產力將無限制地發展，發展到遠非資產階級所能領導的規模，這乃是十分明顯的事！”

此後德波里大大提高了他的設備的功率輸送量並提高了效率。但是，因為發電機的電壓不可能提得很高，直流輸電進一步的發展受到了限制。

幾乎和德波里的實驗同時，發明了用來提高電壓的三相變壓器，於是應用三相電流和三相變壓器就或為輸電技術發展的次一階段。最早的三相輸電線路建立於1890年，從魯芬輸電到法蘭克福。魯芬的發電機電壓是55伏，經變壓器提高到8500伏。輸送距離是175公里，輸送功率約為130瓩（在魯芬234馬力），用試驗測得的輸送效率最大可到75.2%。這一輸電系統是密勒（Miller）所建立的，有我們俄羅斯的工程師多里沃-多布羅沃爾斯基（М. О. Доливо-Добровольский）參加；並用多里沃-多布羅沃爾斯基設計的三相電機裝備起來的。

這設備奠定了由那時直到我們今天幾十年間一直採用的輸電型式。

魯芬設備的輸電距離在很長時間內都還能滿足工業上的需要。不過設備的功率輸送量和經濟性都還不能滿足這些需要。所以那時以後輸電技術發展的第一階段的特點是努力減少輸電線路耗損，爭取達到設備的經濟性。三相導線中的耗損可以近似地作為：

$$\Delta P = 3 I^2 r, \quad (1)$$

其中 I —導線中的電流，

r —導線電阻。

變換上式：

$$\Delta P = \frac{3 P^2 \rho l}{3 U^2 q \cos^2 \varphi} = \frac{P^2 \rho l}{U^2 q \cos^2 \varphi} \quad (2)$$

其中 P —線路的輸送功率，

ρ —導線電阻率，

l —導線長，

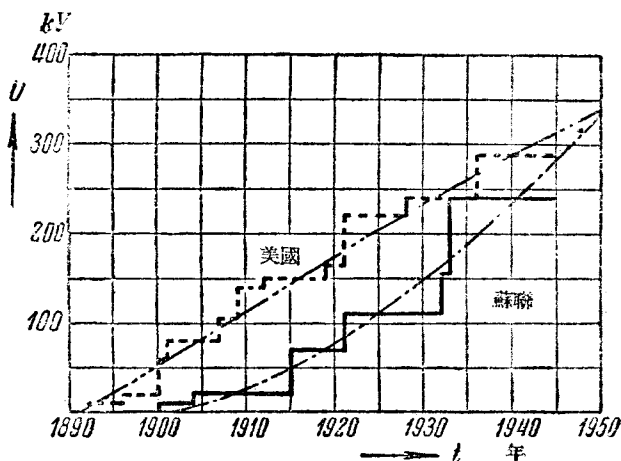
q —導線截面積，

U —線電壓，

$\cos \varphi$ —負載功率因數。

假定 P , l 和 $\cos \varphi$ 為已知，我們知道，耗損就全看導線的電阻率、截面積和線電壓來決定。因為銅——主要導線材料之一——的電阻率幾乎是小到極限了，要減少耗損只有兩法——增加導線的截面積和

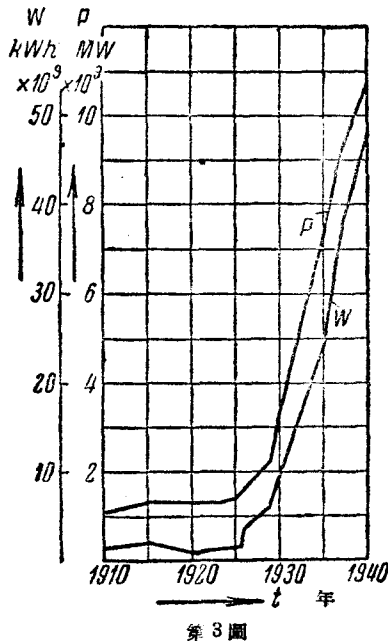
提高線電壓。增加導線的截面積就增加導線材料的重量，因而增加了導線的成本。提高電壓很能減少耗損，而線路的費用增加較小。因此，最合理的減少耗損的方法就是提高電壓。輸電技術實在就是走的這條途徑，其全部發展史的特徵便是繼續不斷地增高線電壓。隨着電壓的提高，輸送的功率和輸送距離也都不斷加大（後者程度較差）了。在美國線電壓的增高見第2圖。同圖上並繪有蘇聯線電壓增高的曲線。將此兩曲線加以比較是很令人感興趣的。該圖顯示，在革命以前，俄國在輸電技術方面是比美國落後得多的。當時線電壓提高的速度是極低的。在十月革命以後，尤其是第一個五年計劃開始後，我們的線電壓的提高速度急遽升高，並且遠遠趕過美國的電壓提高速度。在美國現在有的最高電壓是287千伏（布爾德壩—洛杉磯的輸送線）。在蘇聯的最高電壓是220千伏。戰前製訂的計劃（譬如庫依貝舍夫水力發電廠的計劃）擬把最高電壓大大提高，預定要到350—380千伏



第2圖

蘇聯在衛國戰爭前十年中線電壓的如此急遽發展，是由於我國電氣化的成就及與之相應的電廠裝置容量和發電度數的增加。第3圖

表示的是從十月革命前起，電廠裝置容量和發電度數逐年增加的曲線。由該兩曲線可以看到，第一個五年計劃開始以後發電容量和發電度數特別迅速增加的情形。這種增加的速度是外國技術從來未有的。譬如說，在1922年一月一日美國全部電廠的發電容量約為35000百萬瓦，而1937年一月一日則約為50000百萬瓦。依此則15年間發電容量增加約為50%。在同時期蘇聯的發電容量却增加到6.9倍。美國在第一次世界大戰以前所達到的最高增加速度是五年中功率增加到兩倍，而在蘇聯則在五年計劃中增加到三倍。研究第3圖時不可忽略下述情形：電能生產的增加速度大大地超過發電容量的增加速度。這證明在蘇聯，裝置容量的利用是在不斷地增加的。事實上，如果我們看一下第一表中所舉的蘇聯自1933年到1937年的電站，裝置容量的利用小時數^{*}，則我們就可以知道這增加速度之大了。



第3圖

* 發電站的利用小時數等於其全年發電度數除以裝置容量的指數——編者附註。

在第一表中爲了對照我們還舉出德國和美國在 1929 年的電站設備利用小時數，—— 1929 年是這兩個國家工業最繁榮的時期（1929 年以後這利用小時數就大大地減少了）。應指出，戰爭大大地增加了美國發電站的負載，但在 1943 年美國的利用小時數還是沒有達到 1929 年的水平。

第 1 表

國 家		年	利 用 小 時 數
蘇	聯	1933	3776
蘇	聯	1934	4000
蘇	聯	1935	4706
蘇	聯	1936	5540
蘇	聯	1937	5800
德	國	1929	2830
美	國	1929	4635

從第一表可以看出來，在電廠利用率方面我們遠超過資本主義的最先進國家。我們電廠的這樣高度利用率對我們的輸電技術有顯著影響，因為我們電廠的高度利用率可使我們的線路常有很大的平均年負載。所以，輸送的經濟問題，輸送線路耗損的問題，對於我們有特別重要的意義。

我們知道，線路耗損的問題可以用提高線電壓的方法來求得解決。而提高線電壓的問題又和線路、變壓器和電器的絕緣有密切的關係。在輸電技術發展的第一階段，變壓器製造和電器製造技術超過了線路技術，不久線路的絕緣就成爲限制輸電發展的極限。在二十世紀之初電壓就達到了極限（80 千伏），超過了這個電壓值就不可能再用針式礙子，因為製造上發生了困難。1906 年懸式礙子的發明打破了這局面。在那時間，針式礙子的價值是和電壓的立方成正比，而懸式礙子的價值則和電壓成直線關係。這兩種關係見第 4 圖。