

大學教本

電力傳輸原理

L. F. WOODRUFF 著

SSION

張鍾俊 阮善先 合譯

龍門聯合書局發行



電力傳輸原理

PRINCIPLES OF ELECTRIC POWER TRANSMISSION

By L. F. Woodruff

(Second Edition)

譯 者

張 鍾 俊

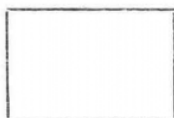
國立交通大學電機系教授 動力工程季刊總編輯

阮 善 先

中央電工器材廠設計工程師 前交通大學輸電學助教

龍門聯合書局發行

電力傳輸原理



版權所有 翻印必究

分類號 5231

100701

發行者

上海英名北路三〇〇
電話 三〇二七七
龍門聯合書局

上海河南中路二一〇號
電話 一七六七四
靜安寺支店

上海愚園路二三一號
電話 三二六八六
龍門聯合書局各地分局

分售處

北京分局	琉璃廠	103號
北京西單支店	西單福壽商場	6號
南京分局	太平路	267號
重慶分局	中山一路	318號
廣州分局	漢民北路	204號
漢口分局	江漢一路	3號
杭州分局	東坡路	57號
瀋陽分局	太原街	40號
瀋陽分銷處	中山路	131號
天津分銷處	天祥市場	三樓
長沙分銷處	府正街	29號
西安分銷處	東大街	387號
台灣分銷處	台北衡陽路	12號

基本定價拾伍元正

外埠酌加郵運費

一九四九年九月初版

一九五〇年三月再版

目 錄

第一章 總論

電業之範圍及其重要性	1
未來電業發達之展望	2
目前互連之趨勢	2
完善供電之要點	4
電壓調節	5
供電可靠性	5
不平衡	6
效率	6
其他各種要點	6
輸電系之要點	7
籌建線路之經濟觀點	8

第二章 電感與電抗

米什克秒制	9
長直圓導線周圍之磁場	10
二平行導線回路之電感	11
n 條平行導線組通鏈之一般公式	12
幾何均距	14
各種形狀之幾何均距	16
常用導線之自幾何均距	17
空心絞線之自幾何均距	19

20.	非均質導線	20
21.	相當自幾何均距	22
22.	鋼心鉛線電纜之電感	23
23.	自幾何均距及電阻表	25
24.	計算電感例題	30
25.	多相線路	31
26.	複回路線路	33
27.	電流不均分佈	39

第三章 集膚作用

28.	集膚作用之原因	43
29.	交流電在圓導線中之分佈	43
30.	圓導線之膚阻比	49
31.	簡解。電流侵入之有效深度	51
32.	鐵線與鋼線	52
33.	鋼軌	53
34.	管狀與片狀導體	53
35.	銅包鋼線	54
36.	絞線	55
37.	密列導線與鄰線效應	55

第四章 介質電路及電容

38.	單位與定義	58
39.	電容之計算	59
40.	長直圓導線周之電場	59
41.	總電荷為零之 n 線系	60
42.	雙線線路	60
43.	等間隔三相三線線路	61
44.	不對稱間隔之三相線路	62

-
45. 地對輸電線電容之影響..... 64
46. 復回路多相線路之電容..... 68
47. 導線尺寸..... 71

第五章 穩定狀態下輸電線之電流及電壓

48. 極短之低壓線路..... 76
49. 長線..... 78
50. 直流長線..... 78
51. 交流線路..... 86
52. 例題..... 89
53. 等值 π 及 T 形線路..... 92
54. 其他計算複變曲線函數方法..... 94
55. 公式集要..... 95
56. 雙曲線函數間之關係..... 97

第六章 圓圖

57. 通用線路常數..... 99
58. 等值 π 及 T 形線路..... 101
59. 受端功率圓圖..... 102
60. 發端功率圓圖..... 104
61. 受端發端總圓圖..... 104
62. 可變端電壓..... 105
63. 耗損圓圖..... 107
64. 直線耗損圖..... 109
65. 效率圓圖..... 110
66. 圓圖公式集要..... 110
67. 例題及作圖..... 111
68. 例題及圖解法..... 115
69. 複合功率圖..... 116

第七章 流動波

70. 概論	119
71. 微分方程	120
72. 無耗損線路上之電壓波	121
73. 電流波	125
74. 接點處之反射	125
75. 由於電阻及電漏之衰減，無失真線路	128
76. 通用解答	132
77. 流動波之實驗觀察	136
78. 交流電壓波	139
79. 疊台公式	141
80. 雷電產生之流動波	143
81. 電路間斷所生之流動波	145

第八章 功率極限及穩定度

82. 靜負載之功率極限	148
83. 連接二龐大電系之小載量線路之功率極限	150
84. 穩定問題之機械比照	150
85. 電機特性之影響	151
86. 瞬變穩定度	157
87. 改進穩定度之方法	160

第九章 線路力學原理

88. 線路構造	164
89. 導線	165
90. 弛垂度及應力分析	166
91. 不等高支柱	167
92. 等高支柱之應用公式	168

93. 不等高支柱之應用公式·····	171
94. 計算弛垂度及應力時之準確度·····	175
95. 溫度-弛垂度，溫度-張力圖·····	175
96. 鐵塔之定位·····	176
97. 其他問題·····	177

第十章 電暈及絕緣體

98. 電暈之長成·····	180
99. 電暈之電子學說·····	181
100. 二線單相及三線等距三相線路之電暈經驗公式·····	182
101. 不對稱及複回路線路電暈之計算·····	184
102. 電位梯度之計算·····	185
103. 電暈耗損計算例題·····	185
104. 氣候對電暈之影響·····	186
105. 電暈對線路設計之影響·····	186
106. 懸式絕緣體電壓應力之分佈·····	187
107. 通電線上絕緣體之測驗·····	190

第十一章 障礙電流計算法

108. 對稱成分·····	196
109. 輸電線阻抗·····	196
110. 變壓器阻抗·····	201
111. 旋轉電機阻抗·····	201
112. 電系中之短路電流·····	202
113. 電力網計算儀·····	207
114. 網絡之簡化·····	208

電力傳輸原理

第一章 總論

1. 電業之範圍及其重要性——經濟關係為支配電力發展及使用之要素。廉價動力之於工業界，猶如發條之於鐘錶，而大眾之安全，舒適及便利均有賴於工業界之進步。電力之發展必須進而與其他形式之動力競爭並將取而代之。蓋就費用，便利，可靠，及安全而論，電力均較勝一籌。平均薪金之高低及生活之水準與各種工業中每人所用之動力甚有關係，美國每一工人約用 5.0 馬力。

表一 美國電業概況註

年份	投資總額		發電廠所裝馬力數
	發電廠	電氣鐵道	
1900	\$ 300,000,000	\$1,500,000,000	
1905	900,000,000	3,000,000,000	2,800,000
1910	1,800,000,000	4,150,000,000	5,600,000
1915	2,700,000,000	5,000,000,000	10,000,000
1920	4,000,000,000	5,000,000,000	18,000,000
1925	6,300,000,000	5,500,000,000	35,000,000
1930	11,800,000,000	5,500,000,000	43,000,000
1935	13,100,000,000	5,500,000,000	46,000,000
1940			

(註) 上表大部係根據美國戶口調查報告及 Electrical World 雜誌所列舉之數字。

除將燃料本身輸送外，傳遞電力為供給長距離動力唯一之方法。唯有電可以利用大規模水力以節省勞力。價廉，便利，清潔，安靜，以及利用高效率之大發電機集中產生動力均電之優點。若非因其設備費鉅大，幾無能與競爭者。

近年美國電業之突飛猛進可於表一所列舉之數字見之，

2. 未來電業發達之展望——電業無論在任何方面，均表現極樂觀之現象，蓋因不斷之進步，使用之增加，以及高等技術工作之需要故也。美國在1910年之始，共有用戶三百萬，迄1920年增加至一千一百萬，1930年又增至二千四百萬，1938年已超過二千六百萬矣，且每一用戶之消耗量亦在增加。不特過去之電器仍能推廣其使用，而新式之電氣用具更層出不窮。發電廠效率仍在不斷增加中，美國蒸汽發電廠，平均每電度消耗煤之磅數在1920年為3.0，1925年為2.1，1930年為1.6，目前效率最高者已不過此數之半而已。似此減低之趨勢，即無新發明亦將繼續相當時期，蓋舊式之廠皆為新式者所代替也。水力發電之效率，近來亦見顯著之增加，但過去所以不能與蒸汽廠之進步比擬者，實以水輪機之效率於過去數年即已在95%左右，故可能之改進較小。近年來蒸汽廠所發之電約為全部電能之60%，其餘40%則由水力發電廠供給。蒸汽廠與水力廠已裝配載量之比約為70%對30%。水力廠所有之負載因數（Load Factor）較蒸汽廠者為高，因輕載時停止蒸汽發電較為經濟也，至於勞力所費亦以水力發電廠為低。

目今美國都市中已有95%之家庭用電，較小城市中則為60%，田莊之房產價在500美元以上者亦有26%已用電矣，而未來小型電器以及其他器械之使用行將數倍於現在。

一國以及世界各種工業之發達對電業之影響甚大，其於全國之進步又有不可分離之關係焉。

若連電器製造及各處之裝置計之，電業每十年之進展皆在兩倍之上，故未來之長足進步可預卜也。

美國地質測量局（U. S. Geological Survey）估計美國可利用之水力約有50,000,000瓩，其中已用者迄1938年不過12,000,000瓩。此後二三十年中，其餘大部行將利用，此或因煤及勞力價格之上漲，或亦為防潦工程之副產品也。

3. 目前互連（Interconnection）之趨勢——現代之趨勢為廢止小型之蒸汽廠而充分發展水力廠，並將大規模蒸汽廠及水力廠以高壓網絡互連之。長距離輸電向為一可採用之電壓問題。最近對直流輸電之可能性又在重加注

意。

發電單位 (Generating Unit) 之定額已由數仟增加至 100,000 仟伏安 (Kva) 之上，發電廠之容量亦超過百萬瓩。由於效率之增進，大規模發電廠每瓩之耗煤量已由四或五磅驟減至 0.9 磅矣。

表二 輸電電壓採用之過程

年份	最高輸電電壓 (仟伏)
1889	4
1892	10
1893	11
1896	25
1900	60
1908	110
1913	150
1923	220
1937	287

在電業中與其他事業相同者，即大單位較小單位之使用為經濟，其理由約有數端。一電廠若僅供給一個用戶，則其發電載量除必須等於此用戶之最大需要 (Maximum Demand) 外，更應有一適當之備用機以應意外事件及修理之需。若用戶甚多，則彼等最大需求在同時發生之可能性實極少。就一般情形論之，其用戶愈多，則分散因數 (Diversity Factor) 愈小，而電廠容量與全部供接負載 (Connected Load) 之比例愈大。(分散因數即為各個最大負載之和除以其全體最大需要之商。) 大廠之負載因數亦恆較小者為高 (任何時期內之負載因數為該時期之平均負載與該期中最大需要之比，實際上用於計算負載因數時之最大負載即為某定期間，如 5 分鐘或 30 分鐘之最大平均負載)。分散因數恆大於一，負載因數則較一為小。大單位之效率較高，其每單位容量所需之費用包括必需之附屬設備計之，亦屬較低。大發電廠中各種節省勞力之器械如自動加煤器等之使用，可較同一總容量而使用小發電單位之廠獲得更多之效果。煤及其他供應品在大量採購時亦可較廉。大組織獲得資金既易，其供應之能力尤非小組織所能比擬，同時技術，經濟，法律各方面之顧問若以每單位載量之費用計之，均屬較廉。在規模極大之電力公司，其所需備用發電容量所佔全部容量百分數，遠比小公司者為小。實際上備用之容量，至少

須在修理一最大發電單位時，足可供應其最大負載。

水力發電之應大量使用無庸再述，所成問題者唯費用與市場耳，因開辦時所需之費用甚大，非有特殊利益不致開發，但當動力需求增加且煤費昂貴時，雖較差之水力，恐亦將加以利用矣！

水力與蒸汽廠之互連能使維持費用大為減小，因水流之時常變動，蒸汽廠可於水流不足時作補充之用，且各流域之涸旱多不於同時發生，故可以收互濟之利。

大量水力之利用每需要裝置甚貴之長距離輸電線，此等長輸電線，僅於傳遞大量電力而其負載因數甚高時始為經濟。

目前之趨勢為藉蒸汽廠與水力廠之互連，配以廣大之輸電網絡以實行普遍之電氣化，此兩種發電廠之合作可以擔保供電及價格之穩定，且將使價格與地域幾無關係，因之各種工業得以散佈各處。此一制度之優點，業經前任西屋電器製造公司董事長 Guy E. Tripp 氏於世界工作 (World's Work) 中撰文陳述如下：

各種工業能得充分利用節省勞力之機械，以增加工人之收入並減輕消費者對人工製成品價格之負擔。

大部鐵道得以電化，所需燃料減至最少，運輸效率大為改進。

工業及舒適之生活環境可得遍佈各地，促使集中於都市之居民散居全國。

農民樂於有一可以代勞之理想工具，由艱苦之工作中獲得解放，肥料之價格亦可大為減低；蓋大量廉價之電力供給使肥料可用極低之價格製造完成也。

家庭可應用電爐烹調，及其他節省勞力之器械。

國防亦得助力，上次大戰中所遭遇之最大困難即為如何獲得充分之動力，以大量生產重要之物資。過去由於電力廠之規模不大，且均散處各地，無從集中電力以大量生產。超電力系 (Superpower System) 之存在，可於緊急時將其載量之任何成數分配予戰時工作，俾軍火工業，因得此鉅量之動力，遂可以最大之速率及最小之勞力而進行，此等工業並可隨意設置於各處，以避免重大軍事上錯誤之重複——如將大部軍火於易受攻擊地區製造之事。

4. 完善供電之要點——發電廠必需經由輸電及佈電設備供給用戶，以定壓或甚近於恆定之電壓，可靠之供應，平衡之電壓（多相時），最小週年費

用之效率，定週率與正弦波（交流時）以及對電話線之無感應干擾。

5. 電壓調節 (Voltage Regulation)——容許之電壓變動量與其所供給之負荷有密切關係。電壓之變動對動力機械及電燈之影響至大，偏僻區域實際上所裝置之電壓調整器無須達到與人口衆多處同一之電壓變化。

電壓變動時麥茲達 (Mazda) 燈特性之影響可由表三得之。一定百分率之電壓變動對燈之燭光及壽命恆產生更大百分率之變化。總之欲求良好之效果，則燈光負載之電壓變動不能超過 5%。

表三 電壓對麥茲達燈特性之影響

額定電壓百分數	正常燭光百分數	正常壽命百分數
90	70	400
95	83	170
100	100	100
105	119	50
110	139	30
115	160	18

發電機之端電壓通常均利用自動調整器以維持其不變。若線路及饋電線 (Feeder) 之電阻及電抗甚低，則可以使負載處之電壓變動減至極小。但實際利用此法以維持調整至滿意之程度則並不可能，必須另行裝置特種儀器以調整電壓。

6. 供電可靠性——用戶因電源發生障礙以致停止工作時所受之損失，遠較同時期內工作所用之電費為大，此蓋因工人、機器與其他裝配之閑置，以及有時材料之毀棄也。一分鐘之停頓，由於準備開動之耽擱，至少須浪費十分鐘之光陰。有時在一完全停頓之後，各用戶同時開動馬達，以致所需電流太大，因之欲使全部開始正常工作，極感困難。當重新開動時，必須謹防斷路器 (Circuit Breaker) 之脫扣。普通開動，須俟高壓佈電系之各饋電線接通，待以片刻後完成之。若低壓佈電系為互相接通者，則又有其他之困難矣！

供電之中斷，常引起公衆之責難及反感，且有時足以造成生命財產之危險。醫院，劇場，與商店之失去電源，每易產生嚴重之後果。故除因所謂“好感”之經濟方面價值外，由於道德以及有時契約之束縛，亦須有不斷電源之供應。

可靠之服務有賴於能抗衡風暴冰雪及斷線拉力之堅固鐵塔，線路等之使

用；並聯電路與饋電線之設置，絕緣器與電纜之經常檢查；及電廠中，限流電抗器 (Current-limiting Reactor)，堅固匯流排 (Bus-Bar)，雙套開關設備與雙重或環狀匯流排之安裝。至於能充分隔離故障之電驛器 (Relay)，導引線路上過高電荷入地之地線與避雷器，適量備用器械，以及隨時應變之員工均屬必需。設更與其他輸電系互連，則於發生故障時尤多助益。最要者乃使用高等機器與絕緣，並謹防過熱以免絕緣受損。此外輸電系之穩定特性亦應使臻於完善之境。

若水力為動力之主要來源，則為適應枯水季節，必需裝置備用之蒸汽或柴油發電廠，或與其他輸電系實行互連。

7. 不平衡——若以不平衡之多相電壓供應於一使用同步或感應電動機之客戶，則將使電動機之效率及最大輸出減低。此時若仍使電動機於滿載情況下運轉，則電動機頗有因過熱而損壞之可能。為保持電壓平衡起見，可僅以平衡負載接於線路，並利用對稱之變壓器接法，與線路導線之對稱排列或適當換位。倘有不平衡或單相負載必須顧及，有時當以另裝饋電線為宜，否則可對負載極不平衡之客戶課以較高費用。其所致電壓三角形之不平衡可藉特殊平衡器減至最小，小心安排各不平衡或單相負載，亦可減小電流之不平衡。

8. 效率——輸電系之效率本身並非極度重要，設計之要點，乃在通盤籌劃一輸電系統，務使發電及送電之功用，得以最低之全年總費用完成之。自然，對將來之發展及最後經濟情形亦應予以適當之注意。線路及機器中之功率耗損雖屬重要，但僅為全年總費用之一項。功率因數 (Power Factor) 對耗損頗有影響，故低功率因數用戶每電度所付費用應較高功率因數用戶為高。等量之功率，低電力因數負載又較高功率因數者需要更大發電容量，且於線路及變壓器中產生較大壓降。

9. 其他各種要點——週率必須維持不變，庶製造工作不致因電動機之速率隨週率變更而受影響。幾乎所有大輸電系均能保持其週率固定不變，故同步電鐘可直接接於電力幹線之上。

供應於用戶之交流電壓應具有正弦波形，因任何諧波 (Harmonics) 均將損害所接機械之效率及最大輸出。使用設計良好之發電機及於變壓器中避免電暈 (Corona) 及高磁通密度，均可防止諧波之產生。負載本身，即如電弧

爐及弧焊接設備，亦能引起諧波，流過此等負載之諧波電流即將產生同一週率之壓降。因此，內生電壓中雖無諧波，而於負載電壓中反有其蹤蹟。

為避免於電訊線路所接器械中產生雜聲及蜂音，電力公司應將輸電線路附近靜電場及電磁場之騷擾盡可能減小。平行於電力線路之電話線路所受之干擾，可藉限制零序 (Zero-sequence) 及諧波，尤其三次諧波之倍數波電流之發生及兩種線路各自之適當換位，加以避免。

電壓及週率之選擇與佈電接線之計劃均屬重要事項。三相幾已成爲電力方面之標準，且有利於輸電及機械之設計。60秒週之週率漸已成美國之標準，雖仍有若干50秒週之設備，並於不少用直流照明之城市中仍有25秒週之電力線路及一次配電線路之存在。紐約即有一25秒週之系統，此外有二系統採用40秒週。然低於50秒週之週率對於電照明即不適合，蓋將產生可覺察之閃爍故也。較高週率尚有一優點，即可使同步及感應電動機之速率變化範圍大爲增加。例如60秒週之同步或感應電動機之額定速率可爲每分3600, 1800, 1200, 900, 720, 600, 514, 450等，而25秒週之電動機則限於每分1500, 750, 500, 375, 300等轉。25秒週之變壓器較同一定額60秒週之變壓器約貴40%至65%，此蓋因週率高則所需之通鏈 (Flux Linkage) 數少，此外60秒週之變壓器之效率亦稍高。線路及機械於60秒週時之電抗爲25秒週時之2.4倍，然60秒週之機械所需之線圈數較25秒週者少，故其電抗亦較少。

10. 輸電系之要點——美國有1000以上之商營電力傳輸線路，其電壓爲44,000或更高，此等線路均爲三相交流，且絕大多數之週率爲60秒週。

高壓電力輸電線之要素爲

1. 導線通常於單路線路其數爲三，於雙路線路爲六。常用之材料爲銅或鋁，鋁可加鋼心用以增其強度。導線可爲實心或由多股絞合。電壓極高之線路，常以扇形或股線作成空心導線。

2. 送電端裝置升壓變壓器，受電端裝降壓變壓器。此等變壓器乃用以減低線路中之電流，庶其中之電阻耗損及壓降不致過大。

3. 絕緣器，用以支持並絕緣導線。

4. 支撐物可爲鐵塔，木桿，木架或混凝土桿。

5. 保護設備，包括

(a) 地線，懸於導線之上，於每一鐵塔或桿處接地。其作用主要為攔防直接雷擊並導電荷入地。此外，可防止由附近雷電所誘起之電壓，增加機械強度；並可充零序電流之回路，以減少對平行電訊線路之感應干擾。

(b) 避雷器，其作用猶如保險活塞。於電壓為正常或略高時，為絕緣體，但電壓更高時，則變為良導體以宣洩線路上過高之電壓。

(c) 斷路器，可充正常時管制之用，亦能於發生故障時自動將故障部分隔斷。

(d) 各式電驛器，用於斷路器之自動操作。有若干種需要特殊之引示線 (Pilot Wire) 或載波波段 (Carrier-current Channel)，其餘均受電力線路之電壓，電流，功率或相角等特性之直接控制。

(e) 地網 (Counterpoise) 或人工接地用於土壤導電性甚劣之處。

6. 電壓控制設備包括

(a) 受電端之同步電抗器。

(b) 發電機及電抗器上之 Tirrill 或其他調整器 (Regulator)。

(c) 感應調整器。

(d) 接頭變換變壓器。

(e) 線路壓降補償器。

7. 控制整個輸電系之雜項設備，即如增進穩定度之速應激磁；調速器及調節週率兼可分配負載於各發電廠之控制設備；通訊設備及功率限制電抗器。

11. 籌建線路之經濟觀點——當負荷中心及發電廠距離遙遠，或兩電力系統均須有備用發電機件以維持不斷供電；或兩鄰系在不同季節間須作電能上之交換時，則自經濟觀點言之，其間應修建一電力傳輸線路。

參攷文獻

U. S. Census Reports.

U. S. Federal Power Commission, National Power Survey.

Electrical World, Statistical Issues. (Usually the first issue of each calendar year.)