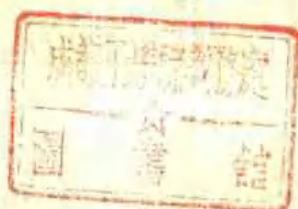


3273

# 輸配電工程

上 冊

楊 津 基 編 著



龍門聯合書局出版

5095

4634

TIKI

# 輸配電工程

上 冊

楊津基編著

龍門聯合書局出版

電機學

輸配電工程

上冊

楊津基編著

---

★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理

新光明記印刷所印刷

上海康定路162號

---

1953年3月初版

印數2001-4000冊

1953年10月再版

新定價 ¥ 29,000

上海市書刊出版業營業許可證出 029 號

## 序

現在關於「輸配電工程」的書還很少。而英美的書又很少適合作為大學用書的。有的祇有數學公式，很少實際的應用；有的祇介紹實際的構造和裝配，不談理論、設計。這兩種書固然都有它的需要；但是作為一本大學裏這門課程的入門書，是不很合適的。因此，編者根據以前講授這門課程的材料編寫了這本書。希望使讀者對這問題能獲得一些理論基礎，作進一步研究的階石，同時也照顧到實用。

在學習的時候，由個別情形來認識一般性的方法比較容易接受，同時不感覺空洞。在應用的時候，正相反，常常是把一般性的方法或原理應用在個別的特殊情形。這本書是想按照這樣的看法編排的。介紹一個問題的時候，一般是由淺入深，由個別情形推演到一般性的方法。

這本書裏沒有講到“電力網穩定問題”和“直流高電壓傳輸”。對於前一個問題，有些學校另設課程專門來討論它，這樣能更詳備，更合乎實際要求。因此，另外由專書來處理這些問題比較更合適些。“直流高電壓傳輸”是比較新的問題，尚在發展中，其中很多是整流問題，範圍也很廣，也不容易包括在這裏。

因為大家現在剛開始大量的寫中文的工程書籍和科學書籍，對於符號、名詞、單位等也還沒有一致的意見。在這本書裏的符號，基本上按右列的規則定的：（一）“瞬時值”用小寫印體字表示，像  $u, i$  等。（二）“矢量”和“複值”用大寫草體字表示，例如  $\mathcal{E}, \mathcal{I}$  等。（三）“有效值”用大寫印體字表示，例如  $U, I$  等。（四）矢量的“絕對值”用兩條垂直線加矢量上表示，例如  $|\mathcal{E}|, |\mathcal{I}|$  等。

請讀者給予協助，指出缺點，這是作者很感謝的。

楊津基 1952年秋

這本書的材料大都從 R. Rüdenberg: “Elektrische Schaltvorgänge”; Th. Euchhold: “Elektrische Kraftwerke und Netze”; L. F. Woodruff: “Principles of Electric Power Transmission”; Kyser: “Die elektrische Kraftübertragung”, H. Waddicor: “The Principles of Electric Power Transmission by Alternating Current”; H. P. Seelye: “Electrical Distribution Engineering”; P. F. Stritzl: “The Protection of Electric Plant (modern methods)” 等書, 和 “Transactions of American Institute of Electrical Engineers”; “Elektrotechnische Zeitschrift” 等雜誌選編而成的, 特在此聲明。

# 目 錄

第一章 電纜及架空線.....	1
第一節 架空線.....	1
甲 架空線的材料和構造.....	1
乙 架空線的計算.....	7
丙 導線的振動.....	50
丁 支架.....	33
戊 支架上導線的佈置.....	50
第二節 電纜.....	56
甲 電纜的種類和他的構造.....	56
乙 電纜的特性常數.....	68
丙 電纜的散熱.....	72
丁 電纜的佈設.....	78
戊 電纜接頭匣.....	85
第三節 電感及電容的計算.....	89
甲 電感計算.....	89
乙 計算電感的實例.....	109
丙 電容計算.....	115
第四節 集膚作用.....	129
甲 導線內電流密度的分佈.....	129
乙 圓線集膚作用的電阻比.....	37
丙 各類導線的集膚作用.....	144
第五節 電暈.....	148

第六節 絕緣電阻及損壞的尋求.....	151
甲 絕緣電阻的測驗.....	151
乙 損壞處的檢查.....	156
第七節 絕緣器.....	168
甲 絕緣器的種類及構造.....	168
乙 沿絕緣鏈的電位分佈.....	174
第二章 電網.....	190
第一節 分佈電網.....	190
甲 配電所地位的選擇.....	194
乙 初級分佈系的佈設.....	195
丙 次級分佈系.....	207
丁 路燈的電路.....	220
第二節 電網計算.....	228
甲 直流電網內電流的分佈.....	228
乙 交流電網.....	286
第三節 電網內經濟問題.....	297
甲 導線截面和材料數量的關係.....	298
乙 支線的計算.....	303
丙 輻射形電線網導線之計算.....	305
丁 配電所的位置.....	309
戊 計算經濟問題的方法.....	310
己 高電壓輸送線的導線截面.....	312
庚 最經濟的導線負載.....	315
辛 平行線路的負載.....	316
壬 最經濟的電壓降落.....	317
癸 初級系的電壓.....	317
子 變壓器的負載.....	319

丑	次級分佈系導線	320
寅	分佈變壓器的間隔	322
卯	次級分佈系的電壓降落	325
辰	次級分佈系的導線截面	328
巳	次級分佈網	329
午	散處的用戶	329
未	支架距離	330
第四節	電壓的調整	331
甲	感應式調節器	331
乙	移圈調節器	343
丙	移磁鐵的變壓器	345
丁	換接變壓器	346
戊	升壓器	348
己	橫調節	350
庚	電網各部份的電壓降落	351
第五節	無功電流的補償	354



# 目 錄

第三章 電力傳輸.....	363
第一節 極短的傳輸線.....	363
第二節 四極電路.....	373
甲 無載試驗與捷路試驗.....	376
乙 “波阻抗”或“瞬變阻抗”.....	378
丙 T形及 $\Pi$ 形電路.....	380
丁 梯級網絡.....	388
第三節 傳輸線.....	400
甲 基本公式.....	400
乙 雙曲線函數.....	407
丙 T等值的及 $\Pi$ 網絡.....	411
丁 用微分方程式解求傳輸線的公式.....	415
戊 電壓波與電流波前進.....	417
己 瞬變阻抗的意義.....	422
庚 沒有損失的線路.....	422
辛 負載下的電波.....	425
壬 近似公式.....	426
癸 傳輸線問題的圖解法.....	429
第四章 捷路問題.....	436
第一節 持續捷路電流.....	437
甲 “未飽和”發電機.....	437
乙 標準特性曲線.....	443

丙	發電機的勵磁	444
丁	圖解法	449
戊	捷路的飽和因數	451
己	漏磁感抗與電樞反應感抗(簡稱反應感抗)	457
庚	發電機的“剩餘端電壓”	458
辛	負載對於捷路的影響	461
壬	具有電阻的網絡	464
癸	例題	468
第二節	瞬變捷路電流	476
甲	物理現象	476
乙	多相電機的旋轉磁場	483
丙	同步發電機的瞬變電流	494
丁	實際應用	503
戊	最大瞬變捷路電流部份	505
第三節	計算聯合網絡內的捷路電流	510
甲	發電廠的“等值發電機”	510
乙	特性曲線的綜合	513
丙	例題	515
丁	多方供應的電網	521
戊	例題	527
第四節	網絡各點的捷路斷連功率	537
甲	發電機端鈕捷路	538
乙	捷路距離的影響	543
丙	例題	545
丁	斷連功率的另一定義	546
第五節	電網的保安系	547
甲	分級保護	555
乙	測距替續器	562

丙	測距替續器的連結	580
丁	差作用保護法	596
戊	信號電流及載流保護法	603
己	平行線路的保護	606
庚	匯流排的保護	606
辛	控制時間替續器	607
第五章 流動波(行波)		612
第一節 均勻導線		612
甲	流動波的進行	612
乙	“能”與“衰減”	617
丙	簡單行波的發生	620
丁	導線末端的影響	626
戊	波形的畸變	630
第二節 不同阻抗組成的線路		632
甲	反射與透入	632
乙	導線的斷連	640
丙	具有保護電阻的線路	643
第三節 線圈和電容器		649
甲	波首的變形	649
乙	線圈和電容器的保護值	654
丙	中間線段的波阻抗	657
丁	線圈和電容器的連合應用	665
第四節 超電壓防護		678
甲	超電壓隔離器	678
乙	架空線的防護	681
第六章 地的影響		685
第一節 連地捷路電流的分佈		685

甲	地線內電流的分佈	685
乙	地下的電流分佈	689
第二節	三相交流系中和點的連地	695
甲	連地捷路電流	695
乙	電網的補償	698
第三節	地線對於連地捷路的影響	703
甲	在線路末端發生連地捷路	705
乙	捷路發生在線路中間	708
第四節	天電的電場	710
甲	連地線的影響	711
乙	電場改變對於導線的影響	716
第五節	電場干擾	720
甲	靜電感誘	720
乙	三相系導線的連地	726
丙	部份干擾和電訊線的連地	728
第六節	交流導線下的地電流	730
甲	電流密度的分佈	730
乙	低週率的地流場	732
丙	高週率的電流分佈	736
丁	地上空氣中的電磁場	739
第七節	對於附近導線的感應干擾	740
第八節	地下的瞬變電流	743

## 第一章 電纜及架空線

發電廠產生的電能大都先匯集在高電壓網上，再由各配電所把電力分佈到各用電區域。範圍比較小的供應區，亦可以由發電廠直接供應。無論匯集或者直接分佈電能，均須靠電纜或是架空線來達到。電纜和架空線對於電力的轉輸和分配的重要，由此不難想見。近代電網的電壓逐漸增高，輸送的距離亦逐漸遼遠，大電網的傳輸線常有橫穿一國的，而電壓也有達到 500 KV 的，因此而產生的困難可想而知。電纜和架空線二種輸電導線各有優點和缺點。隨電壓的增高，電纜製造也越困難，但是大氣對於電纜的影響則比較少。架空線因為裸露在外面，要受霜、雪、風、溫度變化等各種影響，更因為雷閃的打擊而可能引起捷路現象，使得架空線損壞。他的惡果甚至能夠侵到發電廠或配電所以內。架空線雖然有此缺點，但是設備費比電纜便宜，用的仍是很多。

### 第一節 架空線

#### 甲 架空線的材料和構造

架空線路所用導線大都以銅、鋁、銅鋁的合金以及鋼線等製成，那種比較優良，很難下斷語，必須看環境如何再加選擇。不祇導線的導電性能是重要的因素，他的機械和化學的性能也佔一個重要地位。普通所用的導體大都是銅或鋁，以其導電性能優良，需要的導線截面積可以小。支架距離若是過於寬遠，鋁線或銅線的機械應力會不能適應要求，或許有選擇銅包鋼線的需要。霜雪頻繁，氣候惡劣的區域，亦有被迫應用機械強度比較大的導線。總而言之，應依據當地氣候及地理的環境，選擇導線的種類；除技術和自然的影響外，經濟因素也要加以考慮。現在介紹各種導體並且作一比較。

**銅線** 電機工程裏，銅線應用最廣，主要原因是由於它的優良導電性能，它僅次於銀，是各種導體的第二位。銀的價值過於高昂，不適合工業上的大量用途，於是銅就佔了重要地位。用在架空線的銅線大都在硬冷狀態下拉成的，他的“導電係數”雖然比各種電機所用“靱煉”銅線小3%，大約是58與56之比，但是“機械強度”則能由21 [kg/mm<sup>2</sup>]增加到50 [kg/mm<sup>2</sup>]。另一方面，機械強度很高的銅線大都很脆弱，容易摧折，因此，一般讓他的應力祇增高到30 [kg/mm<sup>2</sup>]，而可有6—8%的“延伸”。導線所用的銅質必須非常純潔，銅內如果摻雜0.02% 磷或0.07% 砒，已經能夠使導電性能降到30%。即使是導電性能很好的金屬摻雜進去，也祇能使導電性降低，不能增高。因此，導線的銅必須用電解法加以精煉才可以。銅線的機械強度和溫度有密切的關係。銅線在15°C的機械張力強度是43.8 [kg/mm<sup>2</sup>]；溫度若是增到100°C，機械強度將降到40.6 [kg/mm<sup>2</sup>]；焊接溫度之下則僅為25 [kg/mm<sup>2</sup>]，以後銅線雖然冷卻，機械強度也不能恢復原有的數值，所以對於炎熱地帶和導線內電流產生高溫的影響應該加以考慮。

**鋁線** 應用在輸送線路的鋁線也是“冷拉”的，冷拉後導電性雖然稍微減些，而機械強度却增加，如同銅線的情形一樣。鋁和銅的電阻係數比值大約是0.029/0.0178。想使鋁線和銅線的電阻相等，鋁線直徑應該比銅的大1.27倍，換而言之，鋁所需要的容積大。另一方面，鋁和銅的“比重”的比是2.7/8.9=0.303，於是鋁線直徑雖然大，而重量仍是比銅線輕。和銅線比較，鋁線的機械強度低(30:12)，因此很少應用純鋁線的。

鋁線容易受化學作用的侵蝕是他的缺點之一，鹵及氯的化合物均能腐蝕鋁線。例如海邊的空氣中含有鹽，常使鋁線因此損壞；再像佈設火車路軌附近的鋁線，常因為火車噴出煤氣及煙霧的侵害而折斷。因此在礦區、煉鋼廠、甚至空氣中含硫磺較多的處所安設鋁線，均應考慮這問題，以免日後發生困難，需要更換。近代的研究已經漸漸改善了鋁的這項缺點，增強了他抵抗化學作用侵害的能力。

除導線本身各種性能之外，還須顧到附屬設備的影響。同一電阻的鋁線直徑比銅線的大，鋁線受風壓力的面積因此也大，懸掛鋁線的支架必須相當的堅固來承托他，比銅線的支架須大而牢，這也是鋁線不如銅線的一點。由於鋁的“線膨脹係數”比銅的大，在同一支架距離，鋁線的“弛度”因此也比銅線大，須使鋁線的支架高於銅線的支架，這是鋁線的第二缺點。權衡銅和鋁的優劣，就可以決定導線的材料。含有雜質的鋁線極易發生腐蝕作用，以致摧毀，因此鋁的純度至少是 95%。

**鋁合金** 架空線用的鋁合金含有 0.3—0.5% 鎂 (Mg)，0.4—0.7% 矽 (Si)，0.3% 鐵 (Fe)，其餘是鋁。鎂、鐵等金屬的摻入，可以增加鋁的機械強度，但是成份必須少，以不致引起腐蝕作用，或是減低導電性為原則。鋁合金的機械應力是 26 [kg/mm<sup>2</sup>]，而鋁的僅 12 [kg/mm<sup>2</sup>]。他的導電性比鋁稍差，大約 34.8 與 30 之比。

硬拉的銅線和鋁線，機械強度受溫度的影響甚大，溫度越高，機械強度越低；鋁合金則不然，溫度在 150°C 以內，導線的機械強度受溫度的影響極小。日光和導線內電流所產生的溫度都在 100°C 左右，因此導線的機械強度仍保持 30 [kg/mm<sup>2</sup>]，並不減低。

**鋼心鋁線** 為增加鋁線的機械強度，也有利用機械方法的，鋼心鋁線就是此類方法之一。以鋼線作中心，四周圍再繞鋁線，組合而成，如同圖 1(a) 所表示的。鋁線和鋼線面積的比普通是 6:1，想更增高導線的機械強度，二者面積的比可以高到 4:1。所應該注意的，計算導線的電阻時，鋼線的截面積不能算進去，因為電流大部份通過鋁線，僅僅極微小的一部份經過鋼線。計算架空線的機械應力和溫度影響等，則正相反，應該用整截面積作計算的基準。鋼心鋁線

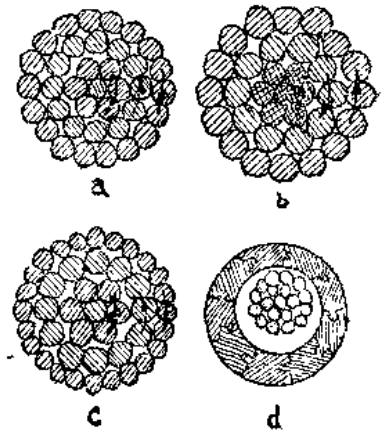


圖 1.

的機械強度大約是  $11[\text{kg}/\text{mm}^2]$ ，比鋁線的  $8[\text{kg}/\text{mm}^2]$  大，因此他的支架距離也能略微遠些。支架距離若是已經按照其他觀點預先確定了，則支架高度可以比應用在鋁線的稍低一點。雖然應用鋼心鋁線可以節省支架，但是本身的價格比鋁線高。

鋼心鋁線圖 1(d) 的構造和其他各種略有不同，近代電壓極高的線路常用他，因為直徑比較大，容易減消電暈現象，及其引起的損失。空心鋁線管中的鋼線是用來承受導線所受的力，使得導線更牢固。類同的空心銅線早就已經應用，但是其中並無鋼線支持。

鋁線容易氧化，表面產生的氧化鋁是絕緣體，所以圍繞在鋼線四周的鋁線彼此絕緣，每一條螺旋形纏繞的鋁線都成爲一個線圈。當電流通過時，鋼線裏會產生磁通，進而促起渦流現象，增加損失。爲減消這類渦流損失起見，可以加大鋁線圍繞的斜度，減少圍繞的匝數，促使“磁勢”(m.m.f.) 和“磁場強度”都隨而低減，損失也就小，這項方法可以應用在單層的鋼心鋁線。鋁線若是有多層，可以讓各層鋁線的纏繞方向不同，使得各層所產生的磁勢互相抵消，像圖 1(b) 的情形。但是外層的導線數比內層的多，磁勢也比較大，因此內外二層的磁勢不能完全抵消，仍有一部份剩餘磁勢。除鋼線內渦流損失之外，又因爲“集膚作用”使得各導線內的電流密度不同，鋁線本身要增加損失。根據試驗結果，普通三層纏繞  $340 \text{ mm}^2$  鋼心鋁線的“外加損失”大約是 8%。假設讓每一層鋁線纏繞的斜度彼此調正，使各層的導線數目和匝數配合，還能削弱上述的剩餘磁勢，減小外加損失。

**鍍鋅鋼線** 鍍鋅鋼線大都應用在相距甚遠的支架。氣候特殊，嚴冬冰雪頻繁，導線受力很大的情形，也有應用鋼線的。鋼是導磁體，“導磁係數”又非常高，隨其中電流的值而改變。因爲受了集膚作用的影響，導線截面內電流的分佈並不平均，靠近導線表面的電流密度大，離導線中心越近，電流密度就越小。電流分佈既不平均，導線內各點的導磁係數也必不同。這些困難使得鋼線的電阻和電感很難計算，一般就用試驗方法來求。非導磁體的導磁係數大約是一，鋼鐵的導磁係數



則很大。因此非導磁體導線內的電感很小，或者可以棄置不顧，可是鋼線裏的電感必須加以顧慮。除此之外，導線因為集膚作用和“磁滯現象”而增多的損失也難計算：（一）因為導線的導磁係數是變數，計算極困難。（二）因為各種鋼鐵的性能不同，雖然屬於同一類的鋼鐵，也不能以任何精確度來宣告它電和磁的“性能常數”，原因是一般鋼鐵的製造祇側重它的機械性能，鋼鐵中成份稍有差別，對於機械性能的影響很少，但是電或磁的性能可能差別很大。有這兩點，鋼線的損失就難於計算了。此類導線的電阻、電抗和損失等都以試驗方法來測求。

“銅包鋼線”這種導線和“雙金屬”相似，但是不應該有雙金屬的特性。先將鋼線四周的空氣排除，再用煅接方法熔以銅層，使銅和鋼連接的地方熔合成一體，毫無空隙存在。雖然將導線彎曲 $180^\circ$ ，銅和鋼不可以有脫離的現象。一般“雙金屬”都不能適合這一要求，導線彎曲太厲害，銅層就被損壞，鋼線露到表面上，漸次生銹，以至折斷。普通雙金屬還有另一個缺點：兩種線膨脹係數不同的金屬附合在一起，常因溫度的影響而致它們接觸的地方受到強大的“剪力”，進而促成單薄外層的破裂，再經過氧化作用，內部就逐漸侵蝕，終至損壞。銅包鋼線決不允許有這現象，否則必須時常更換新導線，既累贅又耗費，極不適用。

除支架距離很遠或者霜、雪頻繁的處所應用此線外，也常用在容易受侵蝕的地域，因為銅抵抗化學作用的侵蝕比較強，這也是優點之一。銅包鋼線的線膨脹係數比銅、青銅等小，因此“弛垂”也小，支架距離要是遠，像跨越河流或山谷等情形，應用銅包鋼線可以減低支架，這是他的第二優點。

銅包鋼線的比重比銅及青銅低8%，導電係數更低，A類的大約是銅的20—30%，B類的30—40%，普通都用B類，下表所列的值是B類的平均數字。參照表內各種導線的性能，再考慮架空線路所經過各地的環境，就能選擇合宜的材料。銅的導電性能和機械性能都好，所以應用也最廣。支架距離若是太長，才有採用銅包鋼線、青銅或鋼線等的必要。