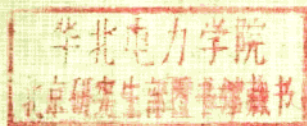


電 輸

(中國工程師手冊電機類第十三篇)

楊 金 穰 編著



中國電機工程學會編行

電 輸

(中國工程師手冊電機類第十三篇)

楊 金 權 編著

中國電機工程學會編行

第十三篇

輸 電

目 錄

第一章 電力的輸送

1.1 緒 言	13-1
1.2 輸電與配電的區別	13-3
1.3 輸電系統的構成	13-3
1.4 直流方式與交流方式的輸電	13-5

第二章 電壓與頻率

2.1 電壓的區分	13-7
2.2 電壓的經濟規劃	13-10
2.3 標準電壓	13-15
2.4 頻 率	13-15

第三章 線路參數與電量

3.1 輸電線路的電阻	13-17
3.2 輸電線路的電容	13-18
3.3 輸電線路的電感	13-24
3.4 輸電線路的電量	13-32

第四章 輸電線的電力特性

4.1 短輸送線	13-36
4.2 中輸送線的 π 和 T 等值電路	13-37
4.3 長輸送線	13-39

4.4	長輸送線等值電路	13-42
4.5	圓圖法	13-45
4.6	輸電容量	13-54
4.7	交流計算盤、模擬輸電線、電腦程式的應用	13-56
4.8	電力系統穩定度	13-66
4.9	以往電力系統穩定度的想法	13-68
4.10	電力系統穩定度	13-76

第五章 輸電系統的電壓調整與故障計算

5.1	電壓調整	13-92
5.2	輸電系統的聯繫	13-95
5.3	電力系統的表示法	13-96
5.4	故障計算	13-103
5.5	中性點的接地	13-108
5.6	中性點接地方式	13-110

第六章 輸電線路之構成

6.1	輸電線支持物	13-113
6.2	導線的種類及特性	13-128
6.3	絕緣磚子	13-134
6.4	電力電纜	13-140

第七章 輸電線路的設計

7.1	概 說	13-187
7.2	設計程序及線路經過地的選定	13-188
7.3	絕緣設計	13-190
7.4	導線的選擇	13-192
7.5	導線及支持物的載重	13-193
7.6	支持物設計步驟	13-196
7.7	施工與試驗概要	13-198

7.8 鐵塔設計	13-199
7.9 輸電鋼柱及鋼管桿	13-212
7.10 輸電用木桿	13-217
7.11 混凝土桿	13-227

第八章 輸電線路的點檢與保養

8.1 架空輸電線路的點檢與保養基準	13-231
8.2 支持物的點檢與保養	13-237
8.3 礙子的點檢與保養	13-251
8.4 架空電線與點檢與保養	13-255
8.5 地下輸電線路的點檢與保養	13-262
8.6 地下供電線路裝置及維護安全規則	13-286

第九章 鐵塔輸電線路之施工

9.1 鐵塔基礎施工方法	13-309
9.2 鐵塔裝建施工方法	13-314
9.3 架線工程	13-316

10047/05

第十三篇

輸電

第一章 電力的輸送

1.1 緒言

在我們的社會生活中，要衣食住行育樂齊足，電力可說是不可欠少的要素。因為電能在動力、光、熱、通信等多方面的利用及輸送較易，所得的經濟價值，比任何一種能源為優。今後亦更被廣用，甚至可與太陽光、水、同樣可想像變為生活上的必需品。尤其在大都市，人類的需求較集中，更需要大容量的輸配電網。最近幾年內，電力輸送有顯著變化，如超高壓輸電線路及地下輸電線路的要求，可說是一個好例。

前述電能的輸送是能源傳輸中最為經濟而容易的特點。事實上輸電線路的用地，及輸送電壓的提高，帶來不少的困擾，尤其是都市週邊的地價昂貴及路徑取得的困難，加上用戶需求增加，以及品質保證，不停電的可靠性，更使電力輸送在供給電能過程中，提高其重要性。

現在世界各國的電力輸送，多採用交流電力輸送方式。在歐美部份地區，採用直流輸電，但我國因為國家經濟能力，暫不考慮直流輸電。台灣電力事業，仍以交流輸電方式。惟輸電電壓，由過去的 154 kV，34.5 kV 升高到 161 kV，69 kV 甚至已躍進至 345 kV，亦已歷五年。現正在準備邁進 750 kV 或採用直

流輸電的經濟價值及其可行性研究中。

交流輸電的方式，雖利多於弊，但其各級輸電線路的聯繫，及大發電廠的發電機與小發電廠的小型發電機均併聯運轉，如發生脫步的故障，或線路上事故，使斷路器啓斷了，而清除故障地區，如保護協調及運轉技術雖無需高深的技能，但仍會導致輸電系統的震撼，甚至有時產生系統分離，引起大停電事故。這些原因是輸電線路起有阻抗（Impedance），將輸電能力限制。在此輸電限界中，對於大電力潮流的動態不穩定時，給予輸電系統加上一大困難。相反，在直流輸電上，就沒有此種交流電的感抗（reactance）及動態電容抗（capacitance），只有靜態電容抗的輸電線路的限制。在國外工業先進國家，已設置交直流輸電用變換設備。解決不少交流輸送電力的癥結。發展直流輸電，以用直流輸送大電力或使用獲地困難的地方，用電力電纜作輸電工具時採用直流方式。為求電力輸送的新知識上，亦要了解新技術。

目前世界各國的輸電，交流方式已由 750 kV 級進到 1100 kV 級，甚至已在研究 1500 kV 級地步。直流輸電亦已經運轉 400 kV 級及 ± 375 kV 的 750 kV 直流輸電。

為此，吾人更為達到滿足需求，要有大電力。有了大電力，必需具備大電力的輸電線，才能趕上先進國家的工業及生活水準。這些技術乃是我們電力界同志共同努力的目標。

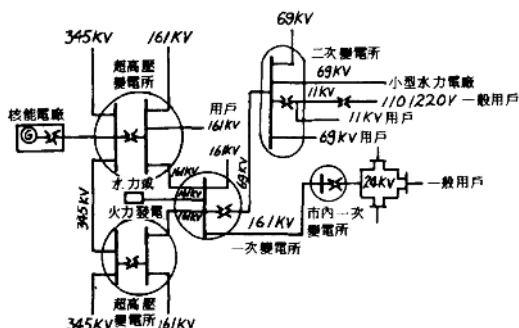


圖 13-1-1 台灣電力公司電力系統的基本構成

1.2 輸電與配電的區別

凡由發電廠所產生的電力，輸送至遠距離的各個用電中心，亦即變電所，稱為輸電。由此用電中心區域，經降壓後，再用線路分配到各方用戶使用，稱為配電。而發電廠至變電所間的線路，稱為輸電線路。變電所至用戶間的聯接線路，稱為配電線路。目前台灣電力公司的輸電系統，包括 34.5 kV，69 kV，161 kV，345 kV 的輸電線路，而配電線路其高壓配電線為 11.4 kV 及 5.7 kV 兩種，低壓配電線為 220 V 及 110 V 兩種。

在圖 13-1-1 中，電源經過遞昇變壓器將電壓升高後，被導入 345 kV、161 kV，69 kV，34.5 kV 級的輸電系統。對於電力大用戶，經變電所變壓後，直接由 69 kV，23.8 kV，11.9 kV 級輸電線供電。特別大者（40 MW 以上者，如中鋼公司）則由 161 kV 輸電線供電。一般用戶則以 11.4 kV 及 5.7 kV 的高壓配電線，220 V 及 110 V 的低壓配電線配電。各地的新工業區、新社區及五層樓以上的建築，已推廣 220 / 380 V 三相四線制的低壓配電方式。台北、台中及高雄市某特定地區，則計劃改以 23.8 kV 或 34.5 kV 的高壓配電系統供電，以應實際需要。

1.3 輸電系統的構成

所謂輸電系統，是指輸電線路及被其連接的發電廠變壓器及變電所等電力輸送設備的總稱，有時將綜合負載亦包括進去。

1.3.1 輸電線路

一般發電廠，遠離需要電力的地點，故產生的電力，必需用相當距離的輸電線路輸送。隨輸電距離的加長與輸電電力的增大，並達成高效率且安全地輸電，需要使用高電壓。因此，促進高電壓輸電技術的發達，導致世界各國超高壓輸電線的發展。如上述的輸電，除將火力、水力或核能發電廠所產生的電力輸送至需要的地點外，尚包括輸電系統的連絡，稱為系統連繫。

1.3.2 變電所

將發電機所產生的電力，經輸電線路輸送至用戶的過程中，爲了經濟上與技術上的理由，需將電壓提高或降低，同時亦需將發電電力集中連繫，再分配給需要者。而變電所主要是爲了達到此等目的而裝設。此外，爲了維持電力的品質，設備的保護，輸電線路的保護、電壓調整及電力潮流控制等目的而設。

一般概念，認爲變電所是「變換電壓、電流及分配電力等設施的集合體」，但在日本技術基準第1條的定義爲；「變電所，是將變電所外輸送進來的電力，用裝設於變電所內的變壓器、整流器或其他機械器具經變換後，再將已變換的電力輸送至變電所以外的地方」。若依此定義，則變電所就不再包括火力或水力發電廠的變電設備，亦不包括用戶自用的變電設備，而僅指獨立的電力用變電所，及電化鐵路用變電所。

1.3.3 輸電系統之型態

若發電廠至變電所，以三相一回線或三相二回線用同一支持物（鐵塔、水泥桿、木桿）而構成單獨的路線，則爲輸電系統中最簡單者。但實際的系統係由許多發電廠，或變電所用輸電線路予連繫而成一個複雜的回路。其大規模者，稱爲大電力輸電系統，或大電力輸電網。下圖（圖13.1.2 (a)）是稱謂放射狀型輸電系統，即以負載爲中心，僅在變電所側連繫者，稱爲放射狀型。圖13.1.2 (b)是

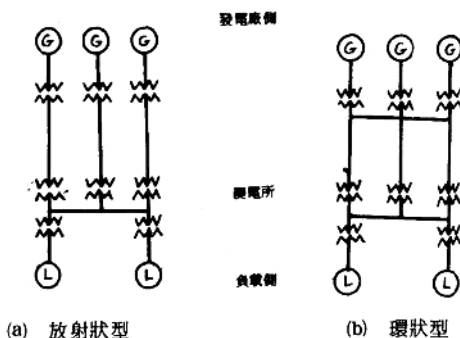


圖 13.1.2

環狀型輸電系統，不僅在變電所側，在發電廠側亦予連繫者，稱為環狀型。當然環狀型就輸電系統而言，其連繫較密。輸電系統的連繫緊密時，則有下列諸優點：

- (1) 其中一部份發生故障時可不必停電。
- (2) 可有效率地集中電力於高度需要處。
- (3) 在線路中產生的開關突波 (switching surge) 等的異常電壓較小，絕緣較易。

但亦有下列諸缺點：

- (1) 故障電流增大。
- (2) 因系統的複雜化，電力潮流交錯，負載的調整困難。

1.4 直流方式與交流方式的輸電

在電力工業發展的初期時代，所有電力均以直流發電直接供給負載。但隨着交流輸電方式的發達，直流輸電方式幾乎不被使用。這是因為線路內的電力損失與流通在線路內的電流平方成正比之故。故欲提高輸送大電力的效率，必須提高線路電壓，而減少電流。

交流輸電，因有變壓器可很方便的將電壓容易提高或降低。相反，直流沒有簡單的變換電壓裝置。但，交流方式輸電，將大電力輸送長距離時，其安定度不穩定，可輸送的電力亦屬有限。因此，必須提高輸電電壓。若提高輸電電壓，即產生電暈 (corona) 問題，而需增加導體的大小 (size)。且在地下輸電的線路，若採用交流方式，則因充電電流較大，則高電壓長距離輸電，就成了問題。

另一方面，用直流方式輸電，對上述這些問題在技術上較為有利。而且由於高電壓交直流變換器的開發，從1950年起，於世界各地方進行實用化。1954年3月，在瑞典本土與Gotland (波羅的海) 島間的100公里，用海底電纜100 kV，40 MW 直流輸電首先開端。但現在普遍被採用的直流輸電方式是，發電廠與配電系統，與從前一樣採用交流方式，而將輸電端的變壓器變昇成高電壓，經由水銀整流器或矽控晶體 (閘流體，thyristor) 整流器變換為直流高電壓後再予輸送。在受電端又以換流器 (AC-DC, converter) 復原，而為交

第二章 電壓與頻率

2.1 電壓的區分

就電力系統結構而言，並無一定的通則可資遵循。唯獨系統係由不同電壓層次（voltage level）以變壓器隔開運轉，則所有系統却是相同的。輸配電電壓層次，可區分為以下三層（如圖 13-2.1 所示）：

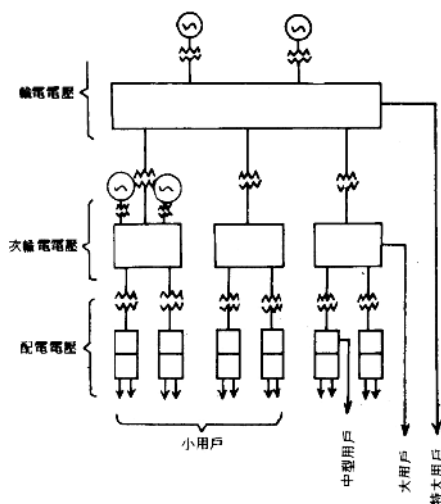


圖 13-2.1 輸電電壓層次

2.1.1 配電電壓 (distribution voltage level)

配電線路乃係整個網路中的末端電路，一般可分為兩種：

- (1) 饋線電壓 (feeder voltage ，如 11.4 kV ， 5.7 kV 等) 。
- (2) 用戶電壓 (consumer voltage ，如 220 / 110 V 等) 。

配電線路是從二次變電所 (distribution substation) 接受電能以供給一般用戶，或小型工業的用電。

2.1.2 次輸電電 (subtransmission voltage level)

次輸電電路，是從發電機母線或大容量的一次變電所變電，以供給二次變電所或大的工業用戶的用電。在美國，次輸電電壓介於 11 ~ 138 kV 之間，在台灣則為 161 kV 及 69 kV，其任務大致與配電系統相同，只是供給更大的地區及更高的電力與電壓。由於負載密度的增加，在經濟上有必要將現存系統的次輸電電壓增高。

2.1.3 輸電電壓 (transmission voltage level)

輸電系統，在運轉及特性上與前述兩者不同。它的任務不僅處理大的電力輸送，同時將系統中所有發電中心與主要負載中心互相聯結。所以系統中的電力依需要可以任意方向在輸電線路上輸送。台電的輸電系統電壓為 161 kV 及 345 kV。

茲就輸電電壓的高低來區分，(如圖 13.2.2) 及一些有關電壓名詞加以闡釋：

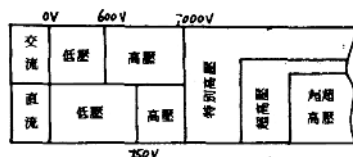


圖 13.2.2 送電電壓系列

- (1) 低壓 (low voltage)：一般規定，直流電壓 750V 以下，交流電壓 600V (RMS 值) 以下，稱為低壓。

(2) 高壓 (high voltage) : 直流 750 V , 交流有效值 600 V 以上 , 7000 V 以下的電壓稱為高壓。

(3) 特別高壓 (very high voltage) : 超過 7000 V 以上的次輸電及輸電電壓 , 即屬特別高壓。如台電目前的 69 kV , 161 kV 等輸電線電壓即是。

(4) 超高壓 (extra high voltage , E.H.V.) : 以特別高壓電的特高電壓稱之。各國間無一定的定義。就一般而言 , 如 220 kV , 275 kV , 345 kV 等 , 即稱為超高壓。目前已被使用的 500 kV , 765 kV 甚至 1000 kV 等電壓。為了與超高壓有所區別 , 稱為超超高壓 (ulter high voltage , U.H.V.) 。

(5) 公稱電壓 (nominal voltage) : 代表線路的線間電壓 , 公稱電壓一般為 11 的倍數。目前各國所使用的特別高壓的電壓系列 , 如表 13·2·1 所示。

(6) 最高電壓 (highest voltage) : 最高電壓被定義為線路上通常發生的線間最高電壓。一般為 11.5 的倍數。表 13·2·1 所示 , 為特別高壓的最高電壓系列。

(7) 最高容許電壓 (highest voltage for equipment) : 此種電壓乃為機器絕緣設計上可容許的最高電壓。一般以 V_m 表示。 V_m 通常為 12 的倍數 , 最高容許電壓系列如表 13·2·1 所示。

表 13·2·1 電壓系列

公稱電壓 kV	最高電壓 kV	最高容許電壓 kV
11	11.5	12
22	23	24
33	34.5	36
66	69	72
110	115	120
132	138	144
154	161	168
220	230	240
345	362	376

(8) 線間電壓 (line voltage) : 相與相之間的電壓, 稱為線間電壓。在三相系統的情形, 線間電壓為相電壓的 $\sqrt{3}$ 倍。一般除有特別說明外, 普通所指電壓即為線間電壓。

(9) 對地電壓 (voltage to ground) : 線對大地間的電壓, 稱為對地電壓。系統如為中性點接地者, 則對地電壓即為相電壓 (phase voltage)。對地電壓通常為線間電壓的 $1/\sqrt{3}$ 倍。但在單相接地故障的情況下, 如當有效接地系統, 對地電壓的上昇約為線間電壓的 0.8 倍, 如為非有效接地系統, 對地電壓的上昇則為線電壓的 1.0 倍。

2.2 電壓的經濟規劃

2.2.1 輸電電壓與電力損失

為了得到高效率的電力輸送, 應盡量減小線路的電力損失。電力損失, 分為因負載電流而產生的銅損, 與因高的輸電電壓而發生的電暈損失 (corona loss)。

(1) 輸電電壓及銅損 :

吾人以一定的電力在一定距離內輸送作考慮, 並擬定為三相三線輸電系統。若線間電壓為 V , 線路電流為 I , 負載電力為 P , 功率因數為 $\cos \theta$, 每相線路的電阻為 R , 則整個三相的銅損為 P_t ,

$$P_t = 3 I^2 R = \frac{P^2 R}{V^2 \cos^2 \theta} \quad (13.2.1)$$

由上式可知, 線路的銅損與使用電壓的平方成反比例。換言之, 若銅損保持不變, 若電壓提高一倍, 則所使用的導線的截面積可減小為原來導線的 $1/4$ 倍。電阻銅損與輸電電力的比, 稱為電阻損失率 R_t ,

$$P_t = \frac{P_t}{P} = \frac{PR}{V^2 \cos^2 \theta} \quad (13.2.2)$$

由上式可知, 如 R , $\cos \theta$ 及 R_t 保持一定, 則輸電電力 P 與輸電電壓的平方成比例。

(2) 輸電電壓與電暈損失 :

當架空輸電線被加高電壓時，導體表面空氣中電位梯度超過某一值時，則空氣絕緣被破壞，而發生放電現象，稱為電暈放電（corona discharge）。因電暈放電而引起的電力損失，稱為電暈損失（corona loss）。為使電暈損失減少而提高輸電效率。勢非將導體表面的電位梯度儘量減少不可。要減少導體表面的電位梯度，就得將導體加大。目前已被採用的如中空銅線，ACSR 導體以及雙導體等，即為減少電暈損失的一種對策。使用電壓越高，電暈損失越大。一般的計算公式如下：

$$(a) \quad P = 4 f C V (V - V_0)$$

此式適用於好天氣，為 Ryam 與 Henline 在 1924 年所提出。

式中 f ：輸電頻率
 C ：線對地的電容量
 V_0 ：電暈起始電壓
 V ：所加電壓（對地 RMS）

$$(b) \quad P = \frac{0.0000337}{[\log_{10} (2s/d)]^2} \cdot f \cdot V^2 \cdot F$$

此式亦為好天氣時適用。為 Peterson 在 1933 年所提出。

式中 P ：導體損失 KW / mile
 f ：輸電頻率
 V ：所加電壓（對地 RMS）
 s ：導體間距離
 d ：導體直徑
 F ：電暈因數（corona factor）；通常由試驗得知，為 V/V_0 比的函數。

$$(c) \quad \Sigma P = P_{r_w} + \left[\frac{V}{\sqrt{3}} J r^2 \ln (1 + KR) \right] \sum_1^n (E^n)$$

此式為雨天時三相的總電暈損失。

式中： EP ：每英里的三相線路總損失
 P_{r_w} ：好天氣時三相每英里的電暈總損失
 V ：相間電壓，kV
 J ：損失電流常數（loss-current constant）

r : 導體半徑, cm。

n : 導體總數

E : 每一導體下緣 (underside) 的電位梯度, kV_r / cm

m : 指數, 約為 5

K : 濕度係數 (wetting coefficient) ; 如雨量率以 mm/hr 表示, 其值為 10。若雨量率以 m/hr 表示, 其值為 254。

R : 雨量 (rain rate)

以上所列諸式, 均為在美國研究發展者。其他各國亦各有研究成果, 皆可得到相近結果, 故僅列出以上諸式作為參考。

2-2-2 經濟的輸電電壓

輸電電壓的提高, 相對的對線路絕緣所需的費用亦提高, 這些項目包括;

(1) 支持導體的絕緣磚子費用增加。

(2) 導線與支持物間及線接距離加大, 導線離地面的高度亦需提高。故支持物就需提高而致增加其費用。

(3) 連接在線路間的變壓器或斷路器等機器設備, 就以同樣容量而言, 因電壓的提高, 其價格必然會增加。

由上可知, 在決定輸電線路電壓時, 須同時考慮由於電壓的升高而增加的建設費用, 及線路損失 (銅損減少, 電暈損失增加) 兩種因素加以檢討。

圖 13-2-3 表示輸電電壓的高低與費用的關係。輸電線路的總費用最少的某一適當電壓, 稱為經濟的輸電電壓。若輸電電力增加, 輸電距離增長, 則此經濟的輸電電壓有提高的傾向。

今列舉三個決定輸電電壓的方法作為參考。

(1) 斯帝爾 (Still) 公式法:

此式為美國 A. Still 在 1920 年所發表。用於小規模輸電線路電壓的選定。輸電電壓 V (kV) 可由下式算得之:

$$V = 5.5 \sqrt{0.6 (\text{輸電距離 } km) + 0.01 (\text{輸電電力, } kW)} \quad (13-2-3)$$

上式稱為斯帝爾公式。對小規模輸電線路電壓的選定很為方便, 惟對長距離