

電力系統分析

(輸配電)

Power System Analysis

原著者：C A. Gross

譯述者：李捷聲 張紀文

科技圖書股份有限公司

前 言

本書目的，在指引同學如何分析有關電力系統問題。預計在一學期六個學分教完。其中主題為正弦穩態線路理論，基本矩陣表示法與運算以及基本電算機程式規畫；當然也涉及某些機械問題，但並非主要。學生至少在大三程度才可修習。

我們假設，本書為供某些學校所有電機科系學生採用，因此標題所涵蓋的具雙料價值不僅專為研究電力工程的學生。尚具學術性參考價值。本書的前半部正為此而編。因此，對稱組成的研究，其重要性不僅在其對電力系統方面的運用，同時對了解所謂自由度與線性轉換亦有所幫助。這並不意味着被化解 (watered down)，其目的只希望在學習過程中，避免被某些不重要的細節，而致徬徨歧路而已。

在導論章中，僅述及轉換電能的重要與傳輸系統的技術部分。同時附列些電力系統的進展陳跡。也提及 SI 單位與電力傳輸的討論。一切均假設其具有充分電源。

本書下餘部分共分成五部分：第二章介紹用在電力系統中的線路理論。對多數學生而言，一部分是複習；一部分是新的，強調些有關對稱分量。學生儘可將平衡狀況視成不平衡的特例。矩陣法，是使方程式組織化，但其導致的過程，並不使其物性了解先被混淆。第三章是解釋基本電力系統表示與標么制。第四、五、六等三章，則導致一般傳輸線、變壓器以及同步機等的傳統數學模式，以上都是為了簡化系統模式。本書並非機械課程教科書，而僅就有關機械部分的嚴格而完整的諧和化略加描述。

第七章是討論有關電力流問題，目的在給學生對問題的明確了解其解答，運用與電算機的利用等。同學在修完該章後，應具規畫此類問題的程式能力。

第八章到第十一章，是分析有關故障問題與系統保護。討論四個

2 電力系統分析

基本故障，用對稱分量方式分析，其故障分析則用電算機求解表示。系統保護的細節也略有涉及。斷路器、繼電器、儀器用變電器等亦都談到。尚有距離繼電器也有解釋。

第十二章討論電力系統的一般穩定度問題。解說暫態與穩態穩定度，單一機器問題也略予提及，如調速器與激發器的影響，等面積法的應用，對此問題相當有效。該問題又可推展到多項機器使 Runge-Kutta 法成為最適宜的計算機分析。

我們必需折衷一下，用何種電算機法求解電力系統問題；沒有多餘時間或空間來詳述理想的程式以解決電力系統問題。更深入的只有專攻電力的專家才需要，另有別書詳述。

全書所用的單位為 SI 制，既簡單又為大眾所接受。同時大部分在標么制下作運算，因其可簡化系統模式，且有跡象顯示往後電力工業仍會繼續發展。其優點在於經過縮尺的標么運算要比未縮尺的簡化了許多。經驗得知，標么運算會給學生某些困難，因此對此標題，本書不會太深入。

最後寫本書目的是為學生而非教師。教師的工作是澄清困難所在，鼓舞學生能進入領域。本書欲使兩者皆有助益，同時，也能滿足非專攻電力工程學生對這方面的基本知識以及未來電力工程師所需的基礎。

C. A. Gross 葛洛斯
Auburn 大學

電力系統分析

目 錄

前 言

目 錄

第一章 導 論

1.0 緒 言	1
1.1 電力工業簡史	2
1.2 SI 單位	7
1.3 電能傳輸	10
1.4 電能的產生	18
1.5 參考書目	20
1.6 習 題	21

第二章 正弦穩態線路觀念

2.0 緒 言	23
2.1 相位表示法	23
2.2 被動元件的阻抗	26
2.3 正弦穩態電路的複數電功率	30
2.4 理想三相電源	33
2.5 平衡的三相負載	37
2.6 對稱分量	40
2.7 對稱分量表示法中的“ a ”運算子	41
2.8 矩陣符號	45
2.9 阻抗的效應	46
2.10 功率諸考慮	48
2.11 總 結	50

2 電力系統分析

2.12 參考書目	51
2.13 習題	52

第三章 電力系統之模型

3.0 緒言	57
3.1 單相分析	57
3.2 標么系統	60
3.3 由標么系統擴展到三相線路	65
3.4 對稱分量化成的標么值	68
3.5 單線圖	70
3.6 總結	72
3.7 習題	72

第四章 傳輸線

4.0 緒言	75
4.1 線電感	77
4.2 線電容	87
4.3 線電阻	93
4.4 線長的考慮	96
4.5 電力傳輸線的最大功率負載	106
4.6 線電壓的變動與補償	109
4.7 線絕緣與雷電	112
4.8 傳輸線的暫態分析	115
4.9 三相線的應用	124
4.10 直流傳輸	132
4.11 電量	133
4.12 總結	134
4.13 參考書目	136
4.14 習題	138

第五章 電力變壓器

5.0 緒 言	141
5.1 三繞線理想變壓器等效線路	141
5.2 真實三繞組變壓器等效電路	150
5.3 三相連接的變壓器	152
5.4 Y- Δ 連接的相位移	159
5.5 雙繞線變壓器	160
5.6 自耦變壓器	162
5.7 可調變壓器	166
5.8 變壓器在非標稱匝比情況下模式的標么值	169
5.9 總 結	175
5.10 參考資料	175

第六章 同步機

6.0 緒 言	179
6.1 同步機構造	180
6.2 同步機等效線路	184
6.3 同步機電性暫態運作	188
6.4 渦輪 - 發電機 - 激發器系統	194
6.5 同步發電機的操作極限	200
6.6 總 結	204
6.7 參考書目	205
6.8 習 題	206

第七章 電力流問題

7.0 緒 言	208
7.1 電力流問題的描述	208
7.2 用 Gauss-Seidel 法解電力流	218
7.3 用 Newton-Raphson 法解電力流	225

4 電力系統分析

7.4 應用例	233
7.5 減少 $[Y_{bus}]$ 貯存的必需條件	240
7.6 總 結	244
7.7 參考書目	245
7.8 習 題	246

第八章 平衡與不平衡故障

8.0 緒 言	248
8.1 系統模式的簡化	248
8.2 平衡的三相故障	254
8.3 單線接地故障	258
8.4 線與線間的短路故障	261
8.5 雙線接地故障	265
8.6 故障系統的內部電壓、電流計算	268
8.7 故障前負載電流的考慮	273
8.8 進一步的考慮事項	275
8.9 總 結	277
8.10 參考書目	278
8.11 習 題	279

第九章 用電算器作故障分析

9.0 緒 言	281
9.1 阻抗矩陣的形成	281
9.2 形成 $[Z]$ 的可程式化法	284
9.3 相序故障阻抗矩陣	291
9.4 一般故障分析方程式	293
9.5 線電流計算	298
9.6 一個應用例	301
9.7 總 結	310
9.8 參考書目	312

9.9 習 題	312
---------	-----

第十章 電力系統保護 I：裝置

10.0 緒 言	315
10.1 系統變數的偵測：儀錶變壓器	316
10.2 繼電器	324
10.3 電路中斷器：保險絲與斷路器	336
10.4 相序濾波器	343
10.5 變壓器保護	349
10.6 馬達與發電機的保護	355
10.7 總 結	361
10.8 參考書目	361
10.9 習 題	362

第十一章 電力系統保護 II：傳輸線路

11.0 緒 言	364
11.1 短線路的超電流保護	364
11.2 方向性的繼電器	369
11.3 阻抗（距離）繼電器	373
11.4 修改的阻抗繼電器	380
11.5 對不平衡故障的距離繼電器回應	383
11.6 前導繼電器	391
11.7 總 結	394
11.8 參考書目	394
11.9 習 題	395

第十二章 電力系統穩定性

12.0 緒 言	398
12.1 同步機的基本運轉方程式	399
12.2 發電機與外系統的簡化模式	403

6 電力系統分析

12.3 預測穩定性：等面積法	410
12.4 擺動方程式的解	416
12.5 多機組系統	420
12.6 發電機電壓控制	433
12.7 渦輪速率控制	438
12.8 總 結	439
12.9 參考書目	440
12.10 習 題	441

附 錄

A.0 傳輸線參數	446
A.1 幾何平均半徑與等效半徑	446
A.2 考慮接地與任意數目的中性點	451
A.3 傳輸線例的結果	457

第一章 導 論

1.0 緒 言

人類文明的進展與其控制能量的能力成比率。少數人有效地控制這些能量，使人類全體能自給自足。在過去，人類可毫無限制地使用能量而不計及自然環境的影響。當時對人們來說，幾是無限制延伸，但今日人口成幾何級數膨脹着，人們不禁要擔憂地球上的資源有限，要用最簡單的方法來生產並控制能量，應是無庸置疑的。

自然界能量釋放的方式計包括下列各種：

- 輻射能：最明顯的便是太陽。
- 熱能：例如地球內部所儲存的熱能。
- 化學能：燃料中，例如：樹木、煤、油等內藏的化學能。
- 動能：運動物體，如行星在軌道運行時便蘊含能量。
- 位能：任何系統中，只要力隨距離而變的，便有位能。
- 核能：束縛原子核內的力，與能量有關。
- 電能：自然界中的電能，便是雷殛。

如同所有生物，直接用自然的能量（日光便是）或將自然能量轉換成我們的目的（利用日光來生產穀物）。依人類的智慧，使我們超越此點，而籌謀貯存、控制並將其轉換成所希望要求的形式。問題已不是擁有效率低的能量，因為這些已不再豐富，重要的是科技問題。如何將其導引到我們所要的實用上。

這些實用為何？我們需要光源，有冷與熱的能力、傳輸系統、交互系統、工業製造程序、合成的運用以及農業生產等。這些都是能量的運用。詳細列出真是不勝枚舉。每一領域，將能量轉成電的形式，均可用得極廣。電能所具若干天生優點計包括：

2 電力系統分析

- 可隨意而有效地控制着，像那種複雜的電視畫面，是由電子槍的控制所構成。
- 可用光速傳遞。
- 可用高效率傳輸或轉換成其他形式。
- 幾乎沒有污染的，轉成電能形式，當然在中間有牽及重要的環境問題。
- 可直接轉換成別種形式。

電能的生產與傳輸系統，目前與將來都是電機科技發展的重點。我們將探討其基本結構，着重在電性方面研究。要注意，電力系統在任何有形量度上都非常巨大：凡舉投資、體積以及所傳送的能量等等。從頭到尾由細而巨的設計一套系統，對我們來說，不切實際。我們僅藉機器本身作深入探討。該系統對我們說來，利用了當今科技的結晶。要最好先從歷史沿革開始。

1.1 電力工業簡史

在西歷1800年以前，只有少數科學家對電磁現象感到興趣。William Gilbert, C. A. de Coulomb, Luigi Galvani, Otto von Guericke, Benjamin Franklin, Alessandro Volta,以及其他一些人，發表些斷殘不全有關電方面的文獻。那時無人知其應用，而且研究的也僅止於好奇。人們用蠟燭、鯨魚油、煤油及一些藉人畜運動所產生的能量來照明。

約自1800到1810年，商業上已有煤氣公司的成立，在英國先發展後傳到美國。油燭及煤油等已在這些雛型工業中激烈競爭，其對象是燃氣燈，對健康構成威脅且易爆炸。但最基本的優點，是便宜的價格，但未能供應更多的燃料。工業繼續在十九世紀中葉穩定成長，1885年達到巔峯。

在同時，人們對電磁現象亦有突破性的了解。Humphrey Davy, Andre Ampere, Georg Ohm與Karl Gauss等都有重大的發現。從

基本的科學現象，提昇到科技而再達今日的成就是經由兩條獨立研究的路徑來完成。Michael Faraday 與 Joseph Henry, Ampere 與其他人等發現磁場由電流所產生，但尚無人知道電流亦可由磁場產生。Faraday 從事這方面的研究，自 1821 到 1831 年，最後發現用他本人姓名命名的偉大定律。他接着製造一具利用磁感應原理產生電壓的機器。現在這種電源器已遠優於 volta 電堆 (voltage pile) 與 Leyden 電瓶。同時 Joseph Henry 也發現電磁感應，在許多方面應用其發現，包括電磁鐵與電報。

尚有許多科學家，包括 Charles Wheatstone, Alfred Varley, Werner, Carl Siemens, 與 Z. T. Gramme 等運用感應原理在 1840 到 1870 年間製造原始的發電機，在比電燈略早幾年又有一重大發現，當兩條帶電的碳棒被拉開時會產生強而發亮的弧光現象。

到 1870 年代已有弧光燈生產，最初用在室內作照明，以後才用在街路上與戶外照明。弧光燈又刺激更好更有效率的發電機生產。有位美國工程師 C. F. Brush 對其所設計的弧光燈與發電機系統有重大貢獻，該系統在商業上成長迅速，僅與若干煤氣燈競爭，因其並不直接在同一種運用上競爭。因弧光燈的光源太集中，故不適於室內用。因此煤氣燈較受歡迎。

在 1809 年時，有人觀察到帶電物質會熱到其白熾點 (incandescence point)，將此現象，利用在照明上是很明顯的。很多人從事研究製造這種設備。最主要的問題在於這些物質很易就燒掉。要改進此種缺點，最好將其包裝在玻璃瓶中，內充氣體或抽成真空。問題在於物質應具高熔點、導電性適中以及好的照明特性。瓶中氣體也要選擇適當，依當時來講，技術要求算是高的。偶有改進，直到 1870 年代，電燈還是渺不可及。但這些努力一直未停，主要因發電機的改進，大家都知道一旦白熾燈發展成功，發電機是不可少的。

當 Edison 在 29 歲時，到 Menlo Park, New Jersey, 在 1875 年時他創建一間電性實驗室研究某些計劃內包括日光燈研究。1879 年 10 月，歷經無數次的失敗，終於製成一個內裝碳化棉蕊的燈泡，可持續 44 小時才燒光。在當時已毫無疑問。日光燈是值得發展的。Edison

4 電力系統分析

繼續改進，同時也改進發電機，使其具 90 % 的效率。在三年後，1882 年首座專售日光燈電力系統在美國開始在紐約的 Pearl Street Station 運作。該系統為直流 (dc)，三線，220/110 V，供應 Edison 的電燈，其功率達 30 kW。這座與其他早期的系統，成為今日世界上最大實業之一雛型。

早期的電力公司自稱為“照明公司”。因其僅供照明。立刻遇到一個問題一直持續到今天。公司接上負載，從天黑開始直到晚上 11 點，並維持固定運作，到時便陡降到一半或更少用量。顯然，系統有一段保持休息狀態，或暫時不用，是否有別處能利用此空間？當時已知有馬達，尚有若干已做好的設備以供商業上用途。於是機動調整的電力系統更受歡迎。且應用到很多方面，電力公司早就成為“電力與照明公司”。

尚有許多困難要解決，負載增加，意指電流的增加。若發電廠離負載太遠，便有多餘的電壓下降，要使發電廠座落在負載附近，尚不太可能。已知電功率與電流電壓乘積成正比，可知少量電流需要較高電壓。但在當時高電壓技術較為困難且安全堪慮。所要做的，是用高壓傳輸電能，經過一段距離到達負載，然後降壓。重點在於有效而可靠的傳送電壓與電流的組件製造。

在 1890 年代，新成立的 Westinghouse 公司實驗成功另一種新的電形式，稱為交流電 (alternate current, ac)，因它的電流是與發電機同步的交互流向。這樣有許多好處。例如，可省掉 dc 發電機的整流麻煩。Edison 的 (General Electric Company, GE) 公司與 Westinghouse 公司間有一爭論，是工業上究應適應 dc 或 ac。ac 依下列幾點理由佔了優勢：

- ac 變壓器具有較佳改變電流或電壓單位的能力。
- ac 本身結構較簡單。
- ac 馬達較簡單又便宜，雖比較不易轉動。

既然建立標準化 ac 中心站 (central station) 的觀念亦需隨着建立，且對加上負載毫無問題。Edison 電燈既方便又明亮且比其競爭

對手（煤氣燈）便宜。許多顧客開始加入其電力公司行列，因使用這種電力，產品不必增加額外投資，每單位能量的價格下降，更吸引更多顧客。

因地域的劃分，便有提昇區域電力的需要。在運作上有個明顯的優點，因在鄰近地區的系統並不同時在尖峯下運作，何不將其連接，使合併的發電設施同時應付一個尖峯負載呢？合併所有發電機與負載的好處為衆人所皆知。不僅合乎邏輯且適合所有用品。但又有技術上的問題發生，在同一時間有許多不同的頻率，包括 25, 50, 60, 125 及 133 Hz，因其連接必需在同頻率下進行，需要昂貴的整頻設施。因此，頻率標準化最是有效。在當時 Niagara 瀑布與其他水力發電均使用 25 Hz，因水渦輪機可配合機器在某速度下運轉效率最高。因此使用此項頻率。25 Hz 的問題，在於會使電燈閃爍。較高的頻率 60 Hz，終於成為國際的標準，因其的電性較易接受，而且蒸汽渦輪機在機器以 3600 與 1800 rpm 轉速時運轉最令人滿意。

電力科技的繼續成長：當一電力事業拓展時，主要便是尋求大容量與高效率的發電機與變壓器。電燈也繼續改進，給消費者每單位能量以更低的價格。電能的價格不斷下降，利用馬達作為機器的驅動者更為普遍。用表 1-1 的電燈電源的改進過程作為例子。

表 1-1 不同能源所發出的光

光 源	效 能 (LUMENS/WATT) 年代	
蠟燭	0.1	—
初期愛迪生日光燈	1.4	1879
竹蕊日光燈	1.7	1881
鎢蕊日光燈	7.9	1904
鎢蕊日光燈 (100W)	10.0	1910
鎢蕊日光燈 (100W)	12.6	1920
鎢蕊日光燈 (100W)	14.1	1930
鎢蕊日光燈 (100W)	16.2	1940
鎢蕊日光燈 (100W)	17.5	1970
400 W 水銀燈	56.2	1970
40 W 螢光燈	78.8	1970
400 W 鈉蒸汽	115.0	—1970

6 電力系統分析

表 1-2 美國最高電力傳輸線電壓

年代	電壓(千伏)
1890	3.3
1900	40
1910	120
1920	150
1930	244
1940	287
1950	287
1960	345
1970	765

表 1-3 美國標準電力操作電壓

電壓類級	公稱線電壓
低	120/240 V (單相)
	208 V
	240 V
	480 V
	600 V
中	2.4 kV
	4.16 kV
	4.8 kV
	6.9 kV
	12.47 kV
	13.2 kV
	13.8 kV
	23.0 kV
	24.94 kV
	34.5 kV
高	46.0 kV
	69.0 kV
	115 kV
	138 kV
	161 kV
超高	230 kV
	345 kV
	500 kV
	765 kV

人們對電力不斷的要求，刺激發展高壓傳輸。表 1-2 列出美國各年代的最高傳輸線電壓。

為避免多種運作電壓，電力公司需選擇其中一值作為標準。表 1-3 列舉其中較普遍的，都是 60 Hz 三相 ac，除非特別標註。下一個考慮的是傳輸電壓，分別是 1000, 1200 及 1500 kV，Edison 起初選定 110 V，後來陸續校正成 115 V 及 120 V，現在已成為美國的標準。

與別的國家電力系統比較起來，美國電力系統算是獨一的。雖然互相連接，它却不是總局所擁有。由數百家投資商所共同擁有。與其他相關組織聯合，如電力器具、照明設備、電纜與其他用具等，該電力公司是全世界最大的。其建造的基本原則如下：設計、建造並在以下條件的電力系統下操作：

- 安全
- 可靠
- 適用
- 無污染
- 經濟

雖然有些短視，歧途，阻礙了電力系統的進步，但其對工業的進展，仍有不可磨滅的貢獻。在未來，仍要在技術上求新求進，並滿足社會對電的需求。

1.2 SI 單位

工程方面天生就需量測與計算。僅了解 y 隨 x 而變是不夠用的。下一步還要預測“多少”與“方向”的改變，因而需要一量度制。大部分量度單位在該領域早期依量度方便為原則而定義下來。例如，德國物理學家 Fahrenheit 選擇塩-冰混合的最低點為“零度”，而一般物體的溫度為上界，他設定此值為 96 度。這單位非常適合 Fahrenheit 的用途，但在一個較大的範圍像熱力學便不夠用。

要將問題帶到較小範圍，考慮以下形式的 Ohm 定律：

表 1-4 SI 單位制的物理量

階段	量	SI 單位	表示符號
I	長度	米	m
	質量	千克	kg
	時間	秒	s
	電流	安培	A
	角度	弧度	rad
II	面積	平方米	m ²
	體積	立方米	m ³
	線速度	每秒米	m/s
	線加速	秒平方米	m/s ²
	角速率	每秒徑	rad/s
	角加速	秒平方徑	rad/s ²
III	頻率	赫茲 (1/s)	Hz
	力	牛頓 (kg·m/s ²)	N
	能量	焦耳 (N·m)	J
	功率	瓦特 (J/s)	W
	電荷	庫倫 (A·s)	C
	電壓	伏特 (W/A)	V
	電通量	庫倫 (A·s)	C
	電容	法拉 (C/N)	F
	電阻	歐姆 (V/A)	Ω
	電導	西門 (A/V)	Ω
	磁通量	韋伯 (V·s)	Wb
	磁通密度	泰斯拉 (Wb/m ²)	T
	電感	亨利 (Wb/A)	H
IV	電場強度	每米伏特	V/m
	電通量密度	平方米庫倫	C/m ²
	磁場強度	每米安培	A/m
	力矩	牛頓米	N·m
	電抗	歐姆 (V/A)	Ω
V	阻抗	歐姆 (V/A)	Ω
	電納	西門 (A/V)	S
	電導	西門 (A/V)	S
	無效功率	無效伏安 (V·A)	var
	實功率	伏安 (V·A)	VA

第一段：基本單位

第二段：無特殊命名之導出值

第三段：有特殊命名之導出值

第四段：單位組合成之無特殊命名之導出值

第五段：特別量值