

電力系統分析

A. R. 伯根 著
劉康立 譯

曉園出版社
世界圖書出版公司

711711

278487

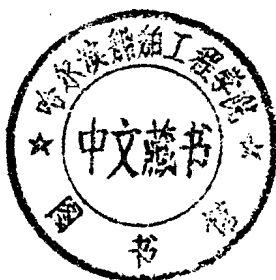
B80

電力系統分析

原著者 Arthur R. Bergen

譯著者 劉 康 立

校 閱 李 永 勳



曉園出版社

世界圖書出版公司

北京·廣州·上海·西安

DW07/19

电力系统分析

A. R. 伯根 著

刘康立 译

·
晓园出版社出版

北京图书出版公司北京分公司重印

北京朝阳门内大街 137 号

北京中西印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

·
1994 年 9 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1994 年 9 月第一次印刷 印张: 19.25

印数: 0001-0520 字数: 46 万字

ISBN: 7-5062-1747-3 /TK.6

·定价: 28.60 元 (W_{9311/2})

世界图书出版公司通过中华版权代理公司向台湾晓园出版社购得重印权

限国内发行

譯 序

本書係譯自 Arthur R. Bergen 所著的“Power System Analysis”。書中之專有名詞皆採用一九八零年教育部公布之電機工程名詞。本書除了適於五專電機機械課程教學之用以外，也可以作為一般大學院校與二專等之教科書或參考書。

就電力系統而言，本書是較新的一本，內容涵蓋了所有應有的認知，再加上許多例題的引導，相信讀者會較容易接受它。

翻譯過程中曾受到詹修儀小姐若干協助，在此略致謝意。雖然翻譯工作力求嚴謹，但疏漏之處在所難免，敬祈各界先進不吝指正。

譯 者 謹 識

一九八五年五月十四日

原 序

本書是由大學四年級兩個學期課程講義編寫而成。在第一學期課程裏含蓋到第九章等面積準則穩定度之判定的大部份課程內容。這部份課程我們稱之爲“核心課程”，想從電力及非電力的主題來介紹電力系統。在前九章教材的安排與選擇上受到單獨這些核心課程並非主要目標的影響。所探討有下列問題：什麼是構成電力系統的元件，什麼是電力規劃工程師和操作者所考慮的因素，使用什麼樣的數學模型和分析方法，如何去做不同於電路分析上的電力系統分析。雖然這些是基礎上所必需的，我們也企圖含蓋一些能說明電力方面具有挑戰性、趣味性和高度貢獻的教材。

這對電力系統主題而言也是一很好的課程安排。例如，在第九章就先提到暫態穩定度，提供一些動機去研究第十章更完整的發電機模式化問題，而在第八章依據旋轉磁場推導的發電機模式化也是有其價值，即使以前修過能量轉換或電機機械課程的學生也覺得在討論更深入課程內容的第十章之前複習一下是有用的。當然，就我們所知，那是兩種觀念彼此相得益彰而實際僅提供一種觀念而已。

這門課僅有一門先修課程：電路學這門課在一般電機工程大學部二年級修畢的課程，它包含網路理論、雙埠網路分析、拉氏轉換的一般介紹、網路轉移函數和回授原理等。我們嚐試利用這些先修課程使這門課和電路及系統理論結合起來。學生們以前修過的回授理論在這門課是不太足夠的，我們必須含蓋控制上根-軌跡法（附錄4）原理。

這本書的內容在兩個學期的學制上較兩個學季的學制上能更清楚的詳述其特點，假如時間不夠，刪去第十、十一和十二章不會嚴重影響其餘內容的連貫性；電發機序電抗在第十三章就已發展出來不必費心去推敲。學生有能量轉換的背景，則第一、三、四和第五章前部份就可以省略，第三和四章探討傳輸線的模型，也可能合理的予以刪除，因爲它只強調系統的

完整，假使受時間限制，第六、七、九、十一、十二和十三章最後面的內容也可以刪除而不影響其連續性。

我要感謝很多幫助我的人，在這些人中，我特別要感謝我的同事Chris De Marco, George Gross 和Felix Wu他們有價值的建議和說明，感謝我的學生，他們幫我校對很多內容，我衷心感激我的秘書Bettye Fuller 和Karen Kerschen他們盡力於本書手稿的打字。

目 錄

第一章 前 言 1

1.0 簡介 1 / 1.1 電能 1 / 1.2 石化燃料電廠
5 / 1.3 核能電廠 9 / 1.4 水力電廠 10 /
1.5 其他能源 13 / 1.6 輸電與配電系統 13

第二章 基本原理 19

2.0 簡介 19 / 2.1 供應單埠的複數功率 19 /
2.2 複數功率守恒 25 / 2.3 平衡三相 31 /
2.4 單相分析 39 / 2.5 平衡三相功率 42 /
2.6 複數功率傳輸(短程) 43 / 2.7 複數功率傳
輸(輻射線路) 51 / 2.8 結論 53 / 習題 53

第三章 輸電線參數 61

3.0 簡介 61 / 3.1 磁學回顧 62 / 3.2 無限長直
電線的磁通鏈 65 / 3.3 多導體情況下的磁通鏈 69
/ 3.4 捆束導體 73 / 3.5 移位 77 / 3.6 電場回
顧 81 / 3.7 線路電容 83 / 3.8 典型參數值
88 / 3.9 結論 90 / 習題 90

第四章 輸電線模型 93

4.0 簡介	93	/	4.1 端點處 V, I 關係的推導	93		
/	4.2 輸電線上的電波	101	/	4.3 傳輸矩陣	102	
/	4.4 等效集總電路	103	/	4.5 簡化模型	106	/
4.6 複數功率傳輸 (長程或中程線路)	108	/	4.7 線路的功率處理容量	110	/	
4.8 結論	114	/	習題	114		

第五章 變壓器模型與標么系統 117

5.0 簡介	117	/	5.1 單相變壓器模型	117	/
5.2 三相變壓器接法	126	/	5.3 單相分析	133	/
5.4 正規系統	143	/	5.5 標么正規化	149	/
5.6 三相標么物理量	153	/	5.7 基準的改變	156	/
5.8 正規系統的標么分析	156	/	5.9 電壓與相角控制用的調節變壓器	161	/
5.10 輸電線與變壓器	163	/	5.11 結論	166	/
習題	166				

第六章 電力潮流分析 173

6.0 簡介	173	/	6.1 電力潮流方程式	175	/
6.2 電力潮流問題	180	/	6.3 利用高斯疊代法求解	184	/
6.4 通用疊代法	191	/	6.5 牛頓-拉夫生疊代法	194	/
6.6 應用於電力潮流方程式	199	/	6.7 分解電力潮流	208	/
6.8 控制上的含意	212	/	6.9 結論	217	/
習題	218				

第七章 電力系統的經濟操作 223

7.0 簡介	223	/	7.1 經濟調度問題的形成	224	/
7.2 古典經濟調度(忽略線路損失)	229	/	7.3 考慮發電機極限	236	/
7.4 考慮線路損失	241	/	7.5 償罰因數的計算(方法1)	248	/
7.6 償罰因數的計算(方法2)	258	/	7.7 結論	265	/
習題	265				

第八章 發電機模型 I (機械觀點) 269

8.0 簡介	269	/	8.1 古典機械描述	269	/	8.2 電壓的產生	271	/
8.3 開路電壓	272	/	8.4 電樞反應	275	/	8.5 端電壓	279	/
8.6 發電機送出的功率	289	/	8.7 使發電機同步於無限滙流排	291	/	8.8 同步電容器	295	/
8.9 結論	296	/	習題	296				

第九章 電力系統穩定度 299

9.0 簡介	299	/	9.1 模型	300	/	9.2 能量平衡	304	/
9.3 搖擺方程式的線性化	308	/	9.4 非線性搖擺方程式的解	310	/	9.5 其他應用	323	/
9.6 擴展至兩個電機的情形	328	/	9.7 多電機應用	330	/	9.8 結論	338	/
習題	339							

第十章 發電機模型 II (電路觀點) 343

10.0 簡介	343	/	10.1 能量轉換	343	/	10.2 應用於同步電機	350	/
10.3 帕克變換	355	/	10.4					

帕克電壓方程式	359	/	10.5 帕克機械方程式	361
/ 10.6 電路模型	362	/	10.7 瞬間功率輸出	365
/ 10.8 應用	365	/	10.9 同步操作	382
/ 10.10 定態模型	386	/	10.11 簡化動態模型	388
10.12 發電機接至無限匯流排 (線性模型)	402	/		
10.13 結論	406	/	習題	407

第十一章 電壓控制系統 411

11.0 簡介	411	/	11.1 激磁器系統方塊圖	412	/
11.2 發電機模型	415	/	11.3 激磁系統的穩定度		
418	/	11.4 電壓調整	420	/	11.5 發電機接至無限
匯流排	423	/	11.6 結論	431	/
			習題	431	

第十二章 電力控制系統 435

12.0 簡介	435	12.1 電力控制系統模型	436	/
12.2 應用於單電機 - 無限匯流排系統	443	/	12.3 功	
率控制系統的簡化分析	444	/	12.4 功率控制 - 多發電機的情	
形	447	/	12.5 特例: 兩個發電機組	450
/	12.6 將電力			
系統分成控制區域	454	/	12.7 結論	458
			/	習題
				458

第十三章 不平衡系統操作 461

13.0 簡介	461	/	13.1 對稱分量	462	/
13.2 使用對稱分量做故障分析	467	/	13.3 單線接地故障的		
序網路連接	474	/	13.4 使用角形網路做故障計算		
479	/	13.5 零序網路	483	/	13.6 雙線接地故障的
序網路連接	485	/	13.7 線間故障的序網路連接		

488	/ 13.8 一般故障電路分析	490	/ 13.9 序變數的功率	491
	/ 13.10 序網路的發電機模型	493	/ 13.11 序網路的變壓器模型	495
	/ 13.12 序網路的輸電線模型	499	/ 13.13 序網路的組合	500
	13.14 問題的形成	502	/ 13.15 矩陣法	508
	13.16 Z 矩陣的計算	519	/ 13.17 結論	525
	習題	526		

第十四章 系統保護 533

14.0 簡介	533	14.1 輻射狀系統的保護	535	/
14.2 兩個電源的系統	542	/ 14.3 阻抗(測距)電驛	546	/
14.4 修正阻抗電驛	550	/ 14.5 發電機的差動保護	552	/
14.6 變壓器的差動保護	554	/		
14.7 匯流排與線路的差動保護	557	/ 14.8 保護區的重疊	558	/
14.9 序過濾器	558	/ 14.10 計算機電驛	560	/
14.11 結論	561	/ 習題	562	

附 錄 563

索 引 595

前言

1

1.0 簡 介

在本章中我們對電力系統作一簡單的描述。電力系統包括了電力來源，即發電廠（或發電機）；電力終端使用，即負載，及連接它們的輸電與配電網路。通常發電廠將石化燃料或核子燃料或者落下的水所獲得的能量轉換成電能。

1.1 電 能

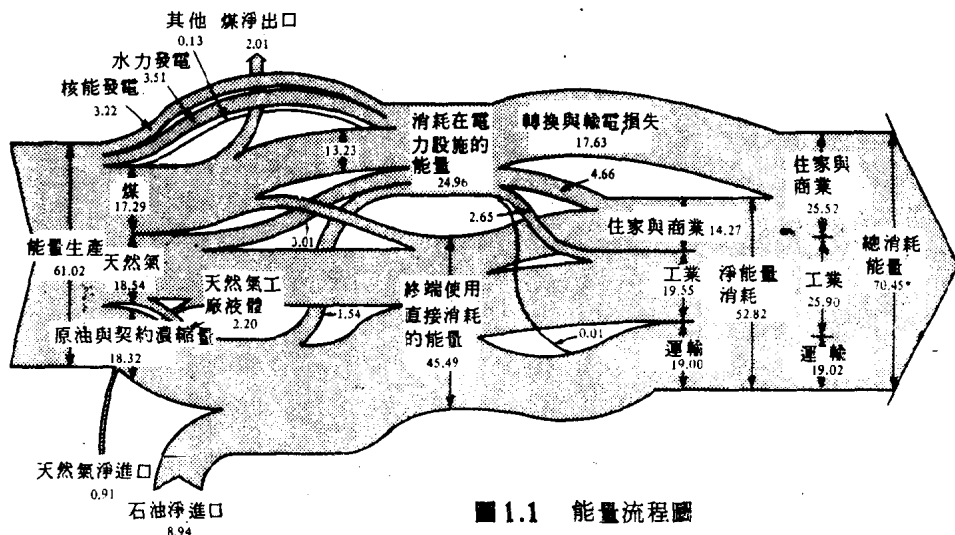
電只是工業、家庭、商業與運輸中所使用各種能量形式中的一種。圖 1.1 為 1982 年美國各種能源使用的綜合情形。最左邊是基本的能源。大約三分之一的能源是用來產生電。其中大約只有 30 % 被轉換成有用的電力；幾乎 70 % 以熱的形式損耗掉。光看有用的（淨）能量消耗，電大約只佔了全部的 13 %；除去運輸所用的能量，其百分比仍不過約 20 %。然而這卻代表了一項大量的高級能量，其使用是千變萬化的，潔淨的（尤其在使用處），方便的，並且在某些場合，是不能用其他能源來取代的。

圖 1.2 詳細說明了電能的主要來源及其發展趨勢。可以發現大部分的生產在所謂的傳統蒸汽電廠中。“傳統蒸汽”是指燃燒煤、石油或天然氣所產生的蒸汽。1982 年大約生產了 2242 十億度的電。其中燃煤佔了約 53

2 第一章 前言

%，燃油 6%，天然氣 14%（傳統蒸汽共計 73%），水力發電 14%，核能發電 13%，其他包括氣渦輪等約 1%。核能與地熱發電也都會產生蒸汽，

單位：（千兆 Btu）



■ 1.1 能量流程圖

但不必然燃燒石化燃料。

圖 1.1 中所用的單位為千兆 (Btu) [10^{15} 或“夸特 (quads)”]，而圖 1.2 中所用的單位為十億度 [或 10^9 瓦特小時或積架 (giga) 瓦特小時]。要使二圖一致，可使用轉換因數 1 瓦特 = 3.413 Btu / 小時。

再看看電力生產的成長情形。圖 1.2 顯示約至 1973 年以前，電力成長率呈指數變化，電力需求約每 10 年增加一倍。1973 年之後電力成長率降低了，反映出石油危機阻礙了世界經濟的成長，並且使得人們更加重視成本效益的問題。

圖 1.3 為美國裝置發電容量的成長情形。1982 年時，全部裝置容量約 650 百萬千瓦，其中 69% 為傳統 (石化燃料) 蒸汽，12% 為水力發電，10% 為核能發電，8% 為氣渦輪，其他佔 1%。和前面所述的生產情形相比較，可以發現各種能源的利用率都有很大的不同。核能發電利用率最高而氣渦輪機最低。稍後將討論其理由。

先算算看 1982 年的整體利用率。假設 650 百萬千瓦容量完全使用。則 1982 年電廠產生了 $650 \times 10^9 \times 8760 = 5694 \times 10^{12}$ 瓦特小時。而實際上只

十億度
3,000

十億度
3,000

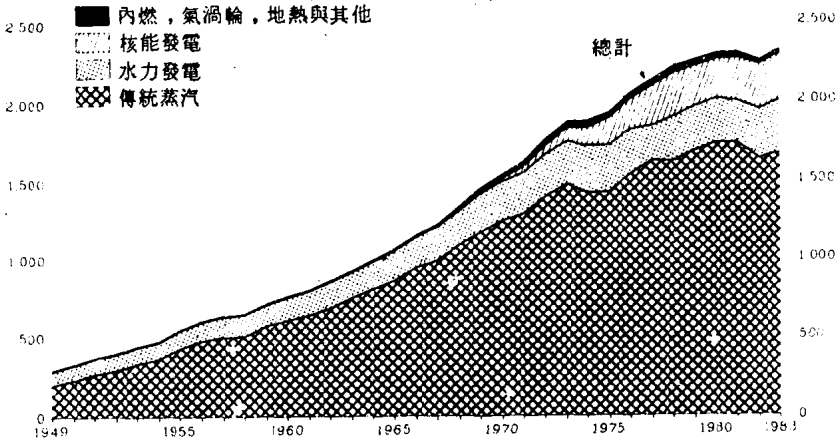


圖1.2 電能生產情形（美國）

百萬仟瓦
700

百萬仟瓦
700

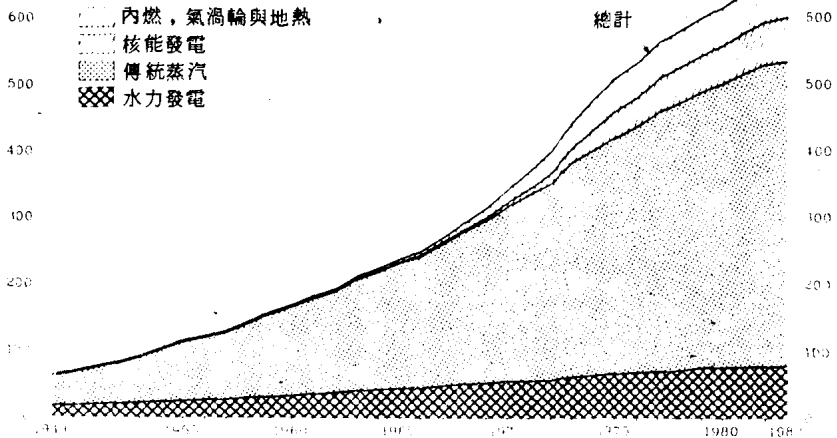


圖1.3 裝置發電容量（美國）

4 第一章 前言

生產了 2242×10^{12} 瓦特小時。因此年度容量因數或負載因數為 $2242/5694 = 0.39$ 或 39 %。我們注意到在 1973 年以前，典型的負載因數約為 60% 並且以後可能會再回復到此一水準。至於此數值為何不會再更高呢？

主要原因有兩個。第一是發電單位不可能一直使用，因為維護與其他“定期停電”的緣故而停止發電；或因為設備故障也導致“強迫停電”。石化燃料蒸汽渦輪的單位“利用率”約由 80 % 至 92 %。

第二個原因和負載有關。因為一定要有足夠的發電容量來應付尖峰負載所需，而負載每日、每週、每季都不同，所以其平均值比較低。每日的變化大致上都呈週期性的，其最小值（基本負載）會比尖峰值的一半還少。某用戶典型的每日負載曲線如圖 1.4 所示。此用戶的（每週）容量因數約為 60 %。

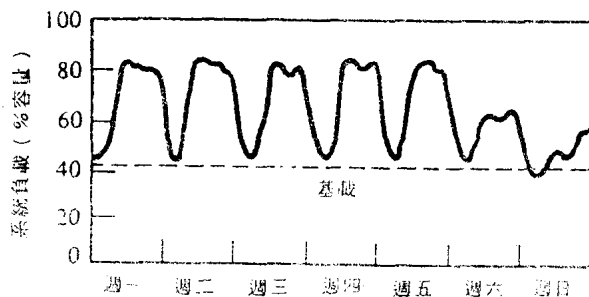


圖 1.4 每小時輸出（典型週）。

在應付不同負載需求時，基於經濟上的考慮，應盡量避免使用高（遞增）燃料成本的電廠而去充分使用低燃料成本的電廠。這個理由，說明了為何核能電廠於基本負載時使用而氣渦輪機卻只用於尖峰電力；這些能源利用率的不同在前面曾經提過。

最後，用人的因素來說明電力的生產與容量。1992 年時美國人口約為 230 百萬人，因此每人的裝置容量約為 $630/230 = 2.3$ 千瓦。以 0.4 作為容量因數，這表示平均每每人能量使用率為 1 千瓦。後一個數字很容易記憶並且相當於此美國的電力消費率。

接著我們介紹幾種典型的電廠能源：石化燃料蒸汽電廠，核能電廠，與水力電廠。

1.2 石化燃料電廠

將煤、油或天然氣在爐中燃燒，產生熱水，變成蒸汽，由蒸汽驅動和發電機相連接的渦輪機。圖 1.5 為典型燃煤電廠的概略圖。簡要地描述電廠的運轉如下：煤從貯煤處取出，送入粉碎機（或磨碎機），和預熱過的空氣混合，吹入爐中燃燒。爐中有由管狀物與鼓狀物組成的鍋爐(boiler)，其中的水管用泵打入水，水的溫度會升高，直至汽化成蒸汽。蒸汽進入渦輪機，而燃燒後的氣體經由除塵器的機械與靜電處理，除去 99 % 的固體粒子（煤灰），再經由煙囪釋出廢氣。

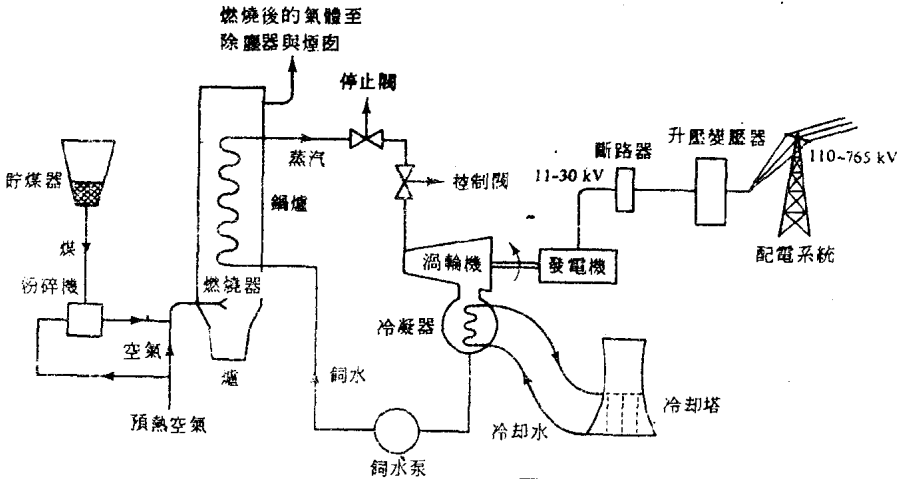


圖 1.5 燃煤電廠（概略圖）

上面描述的機組（以粉碎的煤、空氣與水作為輸入，以蒸汽作為有用的輸出）稱為蒸汽發電機組或爐或鍋爐。若考慮燃燒過程，常採用爐這個專有名詞，若考慮水-蒸汽週期時則常用鍋爐（boiler）一詞了。蒸汽（典型壓力 3,500 psi，典型溫度 1,050°F）經由控制閥與停止（關閉）閥送到蒸汽渦輪機。控制閥調節蒸汽流量來改變渦輪機-發電機機組（或稱渦輪發電機）的輸出。停止閥具有保護功能；正常狀況下它全開但當電力輸出突然降低（由於斷路器的作用）而控制閥並未關閉時，它會“跳脫”關閉以防止渦輪機-發電機機組發生超速現象。

圖 1.5 爲一“單級”渦輪機，而實際上常使用較複雜的“多級”安排，以達較高的熱效率。一代表性的裝設如圖 1.6 所示。其中四部渦輪機以機械彙接在一起並且其蒸汽週期也較複雜。大致上來說，高壓蒸汽從鍋爐（過熱器）進入高壓（HP）渦輪機。離開 HP 渦輪機後回到鍋爐的一段（再熱器），然後導入中壓（IP）。離開 IP 渦輪機後，蒸汽（較低壓力且膨脹了許多）導入兩個低壓（LP）渦輪機。由 LP 排出的廢棄蒸汽在熱交換器，稱爲冷凝器（condenser）中冷卻，變成給水，再加熱（和渦輪機中抽出的蒸汽），然後用泵打回至鍋爐。

最後看看發電機本身。渦輪機轉動發電機的轉子，發電機中的定子上有三（相）繞組。在此過程中渦輪機的機械功率轉換成三相交流電流，在美國其線電壓範圍爲 11 到 30 仟伏，頻率 60 赫茲。電壓常經由變壓器升壓以經濟地輸送至遙遠的負載中心。

發電機〔也稱爲交流發電機（alternator）或同步發電機（synchronous generator）〕的側面圖如圖 1.7 所示；其橫切面約略是圓的。轉子表面平滑且呈圓筒形。蒸汽驅動的渦輪發電機通常是二極或四極式的，分別以每分鐘 3600 或 1800 轉旋轉，以對應於 60 赫茲。爲提高蒸汽渦輪機效率就需要有如此高的轉速。在如此高轉速之下，會產生很大的離心力，限制了轉子的直徑大小：二極式時大約不能超過 3.5 呎，四極式時不能超過 7 呎。

自 1960 年代起，渦輪發電機組的平均功率額定值，從 300 百萬瓦增加至 600 百萬瓦，最大更可以到 1,300 百萬瓦。轉子與定子的大小隨著額定值增加而增加，但是轉子的直徑受到離心力的限制，所以轉子的長度便增加了，因此較大的機組，轉子的長度往往是直徑的五、六倍。這種細長的轉子在比額定速率低的臨界速率運轉時會共振，運轉時要特別注意避免在此速率下持續運轉太久。

接下去看看燃煤電廠的整體效率。舉一個最好的例子來說，田納西流域管理局的天堂電廠，有 1,150 百萬瓦的容量，根據經驗，其淨效率約爲 39 %（即煤中 39 % 的化學能被轉換成電能）。此數字較工業平均數約 30