

高等學校教學用書

電力系統穩定

П. С. ЖДАНОВ 著

張 鍾 俊 譯

龍 門 聯 合 書 局

高等學校教學用書

電力系統穩定

П.С. 日丹諾夫著

張鍾俊譯

龍門聯合書局

本書係根據蘇聯動力出版社出版的日丹諾夫 (П. С. Жданов) 著“電力系統穩定” (Устойчивость электрических систем) 1948 年版譯出的。原書經蘇聯高等教育部審定為高等動力學校和高等電工學校用教科書。

本書討論電力系統中靜態和動態穩定的理論和計算問題。全書共五編。前面四編可作為 40—50 小時範圍內該課程的教材；最後一編是電力系統穩定專門化課程中的研究課題。

本書由上海交通大學張鍾俊翻譯。

電力系統穩定
УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СИСТЕМ
П. С. ЖДАНОВ 著
張 鍾 俊 譯

★ 版權所有 ★

龍門聯合書局出版
上海市書刊出版業營業許可證出 029 號
上海茂名北路 300 弄 3 號
新華書店總經理
華文印刷局印刷
上海濟寧路 143 弄 4 號

開本：850×1168 1/32	印數：6001—7000 冊
印張：12 18/32 插頁：1	1953 年 12 月第一版
字數：347,000	1956 年 5 月第二次印刷
定價：(10) 1.80 元	

序 言

本書是一本教本，因而決定了它的結構和資料的性質。書中前面的四編，提供了關於穩定和基本計算方法問題的一般概念。精簡了某些部份，它們可作為 40—50 小時範圍內穩定課程完備的講材。

在本書簡短的第五編中，提出了複雜系統靜態穩定的某些專門問題，這些問題是專門化課程中的研究課題，對電力工程師並不是無用的。著者確信，幾個發電站靜態穩定計算方法的問題，尚沒有得到完善的實用解決辦法，是無須在穩定的普通課程中按照書中闡明的說法來提及的。含有兩個發電站的網絡，應當是複雜系統靜態穩定實用計算中基本的計算用的網絡。

在本書中，部分地利用了 С. А. 萊倍潔夫和 П. С. 日丹諾夫合著 1934 年出版的“電力系統並聯運轉的穩定”一書內的某些章節。但是，主要資料，特別是全部靜態穩定的資料是重新編寫的。對於同步電機的電磁暫態過程和電抗材料的內容已大大地加以精簡，因為現在這些問題在電機學課程中已經充分完善地闡明了。

著者對 Л. А. 茹科夫與 Д. А. 費陀羅夫同志協助解答例題和繪圖等工作，表示深切的謝意。

П. С. 日丹諾夫

目 錄

序 言

第一章 基 本 概 念

§ 1.1 引言·····	1
§ 1.2 功率特性曲線·····	1
§ 1.3 關於系統靜態穩定的概念·····	4
§ 1.4 關於系統動態穩定的概念·····	6
§ 1.5 機械的模型·····	10

第一編 靜 態 穩 定

第二章 受端功率無限大時的功率極限

§ 2.1 系統電抗的影響·····	13
§ 2.2 飽和對發電機同步電抗的影響·····	15
§ 2.3 理想功率極限的算例·····	17
§ 2.4 凸極發電機的功率特性·····	18
§ 2.5 發電機和受端複合聯接時的功率特性·····	22
§ 2.6 網絡參數對功率特性曲線的影響·····	26
§ 2.7 發電機與受端作複合聯接時,理想功率極限的算例·····	31
§ 2.8 功率的內極限·····	34
§ 2.9 人工穩定·····	39

第三章 受端特性和負載的穩定

§ 3.1 實際功率極限.....	42
§ 3.2 負載的靜態特性.....	45
§ 3.3 實際功率極限的確定.....	51
§ 3.4 發電機無載特性已知時實際功率極限的計算.....	58
a) 隱極發電機 b) 凸極發電機	
§ 3.5 發電機飽和計及時實際功率極限的算例.....	63
§ 3.6 負載的穩定.....	69
§ 3.7 負載穩定的第二種判據.....	73
§ 3.8 靜態穩定的計算和儲備係數.....	78

第二編 動態穩定

第四章 動態穩定計算的基本前提

§ 4.1 問題的一般性質.....	83
§ 4.2 短路時的等效網絡.....	84
§ 4.3 同步機的暫態電抗.....	89

第五章

聯接到無限大功率匯流條的發電站的動態穩定

§ 5.1 面積定則.....	98
§ 5.2 分段計算法.....	104
§ 5.3 聯接到無限大功率匯流條的發電站穩定的計算.....	109
§ 5.4 聯接到無限大功率匯流條的發電站動態穩定的算例.....	109

第六章 兩個有限功率發電站的動態穩定

§ 6.1 在兩個發電站情形中的面積定則和分段計算法.....	115
§ 6.2 兩個發電站動態穩定的算例.....	122

a) 短路時 b) 故障電路拔掉後 c) 拔掉短路極限容許時間

第七章 複雜系統的動態穩定

§ 7.1 一般概念	130
§ 7.2 依據重疊原理作功率的計算	130
§ 7.3 輸入阻抗和轉移阻抗的確定	134
§ 7.4 動態穩定的計算	138
§ 7.5 複雜系統的簡化	141
§ 7.6 複雜系統動態穩定算例	145
a) 系統的參數和正常運轉情況 6) 短路時的運轉情況 B) 故障電路拔掉後	

第三編 同步電機中的電磁暫態過程

引 言	169
-----	-----

第八章 無阻尼繞組電機中的暫態過程

§ 8.1 暫態電抗後電勢的變化	169
§ 8.2 三相短路	174
§ 8.3 具有電壓調整器時的短路	176
§ 8.4 聯接到無限大功率匯流條的發電機中的暫態過程	178
§ 8.5 功率的振盪	181

第九章 電勢變化時穩定的計算

§ 9.1 聯接到無限大功率匯流條上的發電機的穩定	186
§ 9.2 含有幾個發電站系統穩定的計算	193
§ 9.3 電勢變化時穩定的算例	202
a) 正常運轉情況 6) 短路時 B) 短路電路拔掉後	

第十章 動態穩定計算的特殊問題

§ 10.1 負載的動態特性	212
§ 10.2 電力系統的模型	218

第四編 提高穩定的方法

引 言	229
-----------	-----

第十一章 短路電路的高速扳掉

§ 11.1 一般概念	229
§ 11.2 快動開關器和快動保護	232
§ 11.3 重復合開	239
§ 11.4 按相開斷	242

第十二章 發電機的參數

§ 12.1 發電機的電抗和慣性常數	246
§ 12.2 功率因數	251
§ 12.3 阻尼繞組	252

第十三章 自動電壓調整器 and 高速激勵機

§ 13.1 電壓調整器對動態穩定的影響	261
§ 13.2 電壓調整器和靜態穩定	269

第十四章 原動機的調整器

§ 14.1 渦輪機調整器的特性	278
§ 14.2 電機搖擺時調整器的行為和它們對於穩定的影響	282
§ 14.3 穩定破壞時的整步	285
§ 14.4 輸入輸電線路中功率分配的調整	291

第十五章 中點接地和加載電阻

§ 15.1 中點接地	296
§ 15.2 加載電阻	301

第十六章 輸電線路參數的補償

引 言	304
§ 16.1 通用常數	304
§ 16.2 圓圖	307
§ 16.3 $1/4$ 波長和半波長傳輸線的運轉情況	312
a) $1/4$ 波長 b) 半個波長時的運轉情況	
§ 16.4 長線的補償	318
§ 16.5 部分補償	322
§ 16.6 電壓穩定	324
§ 16.7 長線的接線圖	327

第五編 複雜系統中的靜態穩定

第十七章 兩個發電站的靜態穩定和小的振盪

§ 17.1 一般概念	330
§ 17.2 在無限大功率匯流條運轉的兩個發電站情形中的小振盪法	330
§ 17.3 在兩個發電站情形中穩定的判據	335
§ 17.4 同步功率和相對加速比的計算	341
§ 17.5 凸極發電機的同步功率和相對加速比	344
§ 17.6 同步功率和相對加速比的算例	348
a) 外功率特性曲線 $P_1 = f(\delta_{12})$ b) 同步功率和相對加速比	

第十八章 複雜系統靜態穩定的計算

§ 18.1 計算原理	354
§ 18.2 同步功率的計算	356
§ 18.3 關於複雜系統靜態穩定計算的一般意見	365

第十九章 複雜系統的小振盪

§ 19.1 複雜系統的小振盪	368
§ 19.2 頻率變化的影響	376
附錄 I 標么制	382
附錄 II 補充材料	386
附錄 III 三角函數表	387

第一章 基本概念

§ 1.1 引言

龐大電力系統中和擾害並聯運行穩定有關的事故，要引起廣大地區和城市供電的混亂。這種事故的清除和電力系統運行的正常條件的恢復是有不小的困難，並且需要調度和值班人員不少的時間和精力的。在比較不多的幾次引起擾害穩定的事故中，最嚴重的事故性的電力停送就是由這一種事故所造成的。

例如，在蘇聯的某一最大電力系統中，在七年期內具有 44 次和擾害穩定有關的事故。其中有 33 次喪失了動態穩定，而有 11 次喪失了靜態穩定。在這許多次的事故中，事故性的電力停送佔總數的 70% 左右。

這種事故的嚴重後果，促使在進行發電站和電網的設計以及操作時，對增進穩度的問題，加以十分的注意。穩定問題在電力系統的開關線路圖、運行條件以及設備的參數方面，都已烙上了一個深刻的痕跡。這裏可指出的是高速開關器，繼電器保護，具有低電抗的發電機和變壓器，特種電壓調整器，高速激勵機以及促進蘇聯電力系統中減少事故所用的其他措施。

在遠距離電力輸送中，穩定問題的意義格外地重大。可以肯定地說，系統的穩定是限止交流電遠距離傳輸的主要因素。

在穩定問題中，須指出問題的二方面：所謂靜態穩定和動態穩定。我們就將在下面對它們加以討論。

§ 1.2 功率特性曲線

我們將討論一個最簡單的輸電網絡（參閱圖 1.1），其中發電機經變

壓器、傳輸線把功率輸送到受端的匯流條。受端處代表一個系統，它的功率和這裏傳輸線所輸送的功率相比，是大到這樣的程度，以致在任

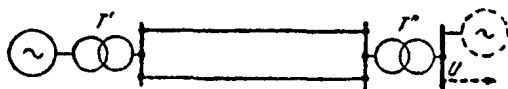


圖 1.1 電力傳輸的基本網路

何電力輸送條件下，受端電壓 $\dot{U}$ 的大小和相位，可以認為是恆定不變的。在圖 1.2 中，示出輸電系統的等效網路，其中電阻及電容均略去不計，並且網路中的元件，僅用它們的電抗來表示。系統的組合電抗為發電機、變壓器及線路電抗的和，即

$$X_c = X_T + X_T' + \frac{X_l}{2} + X_T''.$$

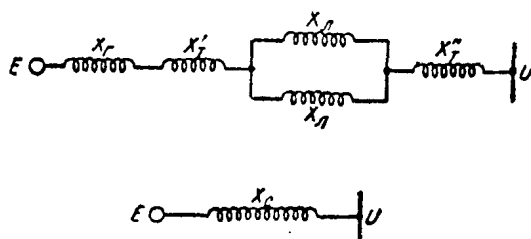


圖 1.2 輸電系統的等效網路

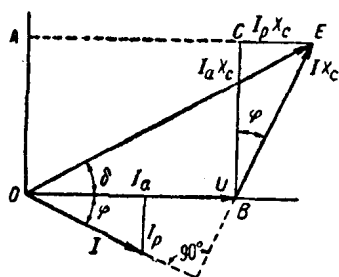


圖 1.3 輸電系統在
正常運轉情況下的矢量圖

在圖 1.3 中，示出輸電系統在正常運轉情況下的矢量圖，在圖中，由於線段 $OA = E \sin \delta$ 及 $BC = I_a X_c$ ，二者的長度相等，因此獲得下面的關係：

$$I_a X_c = E \sin \delta,$$

式中 I_a ——電流的有效分量；

δ ——電勢矢量 $\dot{E}$ 和受端電壓 $\dot{U}$ 間的相角。

若在等式的兩邊同乘以 $\frac{U}{X_c}$ ，則

不難獲得：

$$UI_c = \frac{EU}{X_c} \sin \delta,$$

或

$$P = \frac{EU}{X_c} \sin \delta, \quad (1.1)$$

式中 P ——輸送至受端的有效功率*。

當發電機電勢 E 及受端電壓 U 恆定時，傳輸功率 P 的大小的變化，祇是由對應於角度 δ 的變化所致。如所週知，發電機輸出到受端的功率的變化，可以藉發電站內汽輪機上的調節機構的作用而實現。在原來運轉情況下，汽輪機的功率和發電機的功率是互相均衡的，因而發電機依恆定的速率旋轉。

隨着調節閥(或導葉鉸)開啓的程度，汽輪機的功率增加了，於是汽輪機和發電機間轉矩的均衡遭受到破壞，以致引起了發電機轉動的加速。

當發電機加速時，在圖 1.4 中的電勢矢量 $\vec{E}$ ，對系統受端不變速度的電壓矢量 $\vec{U}$ ，發生了相對的移動。隨着上述角度 δ 的增加，發電機的功率，依照(1.1)的關係也作對應的變化，一直要增加到和汽輪機的功率再抵達均衡為止。所以角度 δ 是可以用來直接地確定發電機傳輸給受端的有效功率值大小的一個量。

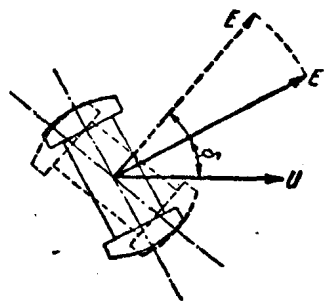


圖 1.4 發電機的電勢矢量

由(1.1)，可以知道：傳輸功率 P 和角度 δ 的關係，具有正弦曲線的關係(參閱圖 1.5)，因之，傳輸功率的大小，在開始時係隨角度的增加而增加的，但在抵達了最大值後，則開始下降。

在大小一定的發電機電勢 E 及受端電壓 U 之下，這系統中傳輸功

* 式(1.1)是從單相電路導出的。假如 E 和 U 都採用了線間(即相與相之間)的數值，那末 P 就是三相的總功率，採用了本書的標么制(參閱附錄 I)，一般就無須顧到相電壓和線電壓間的區別。

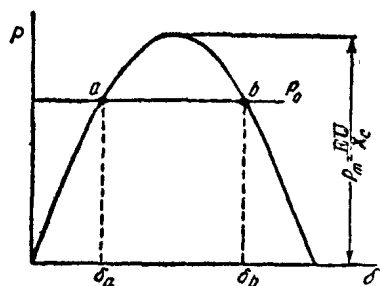


圖 1.5 功角特性

率的最大值爲：

$$P_m = \frac{EU}{X_c} \quad (1.2)$$

上式稱爲“系統的理想功率極限”。祇在功率的數值小於理想極限時，汽輪機和發電機的功率，才可以抵達均衡。對汽輪機某一固定的功率 P_0 ，在發電機的功率特性曲線上，一般地說：有兩個可能的均衡點，

即有兩個角度值： δ_a 及 δ_b （參閱圖 1.5）。但是實際上祇有在點 a 處，靜態穩定的電力輸送方才可能的。在功率曲線下降部分的點 b 處，運轉情況是不穩定的，因之這種運轉情況不可能長久地存在。

§ 1.3 關於系統靜態穩定的概念

在上述最簡單的條件下，離開平衡狀態很小時，迫使系統重新恢復到原有平衡狀態的功率和轉矩變化的特性，可以用來作爲系統穩定的特徵。

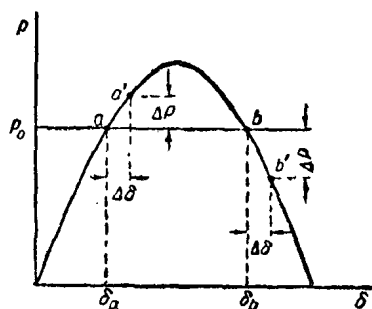


圖 1.6 靜態穩定的確定

在點 a 的運轉狀況中（圖 1.6），發電機及汽輪機的功率係彼此均衡的。假設角度 δ_a 獲得了一個小的增量 $\Delta\delta$ ，那末隨着這角的正弦函數而變化的發電機的功率，也要改變 ΔP 。由圖 1.6 可以看出，在點 a 處，正的角增量 $\Delta\delta$ ，相當於發電機正的功率變量 ΔP 。至於汽輪機的功率，則和角度 δ 無關，當後者任意

變化時，它仍然維持恆定而等於 P_0 。發電機功率變化的結果，使發電機和汽輪機間轉矩的均衡遭受破壞，由於發電機的制動轉矩超過了汽輪機的轉矩（因為功率變量是正的），於是在發電機的轉軸上產生了具有減速性質的過剩的轉矩。

在制動轉矩的影響下，發電機的旋轉開始變慢，因而引起了與發電機轉子有關的電勢矢量 $\vec{E}$ 向角度 δ 減小的方向移動。由於角度減小的結果，運轉狀況又重新恢復到起初的點 a 處，因而這種運轉狀況應該認為是穩定的。當點 a 處有一個負的角增量 $\Delta\delta$ 時，也可以得到同樣的結論。

在圖中的點 b 處，情況將完全不同。這裏，正的角增量 $\Delta\delta$ ，帶來了不是正的、而是負的發電機功率變量 ΔP 。發電機功率的變化，引起了具有加速特性的轉矩的出現，在它的影響下，角度 δ 非但不會減小反而是增大了。隨着角度的增大，發電機的功率繼續下降，因而引起了角度的繼續增大。這程序不斷地進行着，同時矢量 $\vec{E}$ 也不停地對系統受端的電壓矢量 $\vec{U}$ 移動位置（圖 1.7）。發電站於是失去了同步。非同步的運轉狀況，同時帶來了電流和功率急劇的振盪，並使發電站和受端的並聯運轉變為不可能。

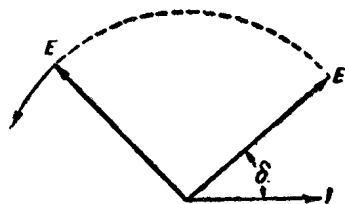


圖 1.7 失却同步

所以在點 b 的運轉狀況不是靜態穩定的，因此實際上是可能存在的。

靜態穩定一般是指系統在很小的擾亂下、獨立地恢復到它起初的運轉狀況所具的能力。靜態穩定的存在，是系統穩定運轉的必須條件，但它並不能在急劇的擾動下（例如在短路時）事先確定系統繼續運轉的能力。這一方面的問題，即所謂系統的暫態穩定，將在後面再加研究。

因之，在點 a 和在正弦功率特性曲線的上升部分上其他任何一點，都是靜態穩定的。相反的，在曲線下降部分的所有點，都是靜態不穩定的。由上面討論過的在點 a 及點 b 處確定系統運轉條件的見解，即可直接得出用算式來表明系統靜態穩定存在的標誌或判據。

角度 δ 及發電機的功率 P 的增量具有相同的符號，即

$$\frac{\Delta P}{\Delta \delta} > 0$$

是系統穩定必要而充分的條件。

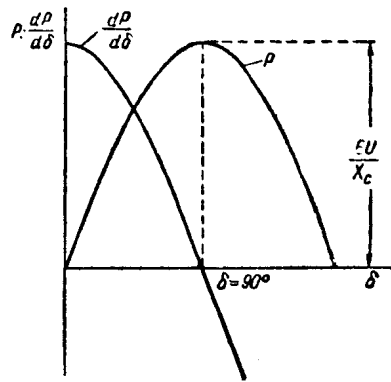
或寫成極限式：
$$\frac{dP}{d\delta} > 0. \quad (1.3)$$

如所週知，導數 $\frac{dP}{d\delta}$ 稱為同步功率，因之，同步功率的正符號可以作為系統靜態穩定的判據。

根據 (1.1) 式，將功率對角度微分，得：

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{EU}{X_c} \cos \delta. \quad (1.4)$$

當角度 $\delta < 90^\circ$ 時，上式的導數是正的（參閱圖 1.8）。在這個範圍內，系統的穩定靜態運轉是可能的。在討論的情形中（當發電機和受端用純電抗連接時），從穩定的觀點看來， $\delta = 90^\circ$ 已是臨界的角度值，這時運轉情形已抵達了功率特性曲線的極大值處。



§ 1.4 關於系統動態穩定的概念

單憑在穩態運轉時系統保持靜態穩定這情況，尚不能肯定地說，在系統遭受急劇的和突然的擾害運轉情況時，像在短路、拉掉發電機或線路等時，系統也是穩定的。這方面的問題涉及有關所謂電力系統動態穩定問題的範圍，必須獨立地加以研究。

所以，在靜態穩定的研究中，必須涉及很小的系統運轉的騷動（在系統不穩定時要發展到失却同步），而動態穩定的研究課題，則是一些有限大的和急劇的騷動，它的性質和程度具有重大的意義。

為了闡明動態穩定的基本原理，我們現在討論在雙迴路傳輸線路

圖 1.8 功角特性和同步功率

突然扳掉了一個迴路(圖 1.9)時所發生的現象。

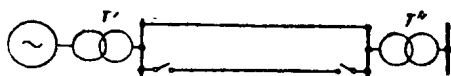


圖 1.9 扳掉了一個迴路的網絡

圖 1.10 a 示在正常運轉時的傳輸網絡。系統的電抗等於：

$$X_c = X_r + X'_T + \frac{X_{\Delta}}{2} + X''_T.$$

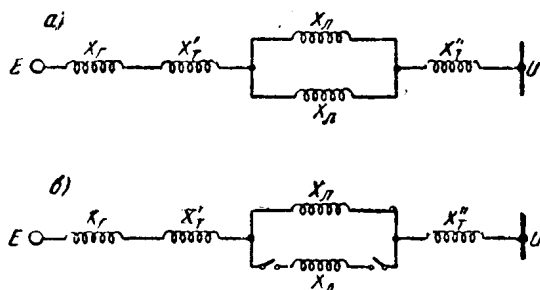


圖 1.10 傳輸線路的等效網絡

a) 正常情況，b) 扳掉了一個迴路後。

這電抗可用以決定在那個條件下功率特性曲線的波幅，

即

$$P_m = \frac{EU}{X_c}.$$

如果發電機中電磁暫態過程的影響暫不計及，那末當傳輸線路的一個迴路扳掉後，系統的電抗可以用新值

$$X'_c = X_r + X'_T + X_{\Delta} + X''_T$$

來代表，因為現在線路的電抗已由 $\frac{X_{\Delta}}{2}$ 增加到 X_{Δ} ，所以這電抗要比正常情況時大些。扳掉了一個迴路後功率特性曲線的波幅相應地減小到 $\frac{EU}{X'_c}$ 。圖 1.11 示正常運轉和扳掉了一個迴路兩種情況下的二條功率

特性曲線。如果在扳掉迴路前一瞬間，工作情況是由正常功率特性曲線的點 a （輸出功率是 P_0 ，角度是 δ_0 ）所確定的，那末在扳掉迴路後工作情況必須應用新的功率特性曲線來確定，並且在扳掉迴路後一瞬間，