

電力系統的 機電暫態過程

滕 莒 森 編 著

科 學 出 版 社

电力系统的机电暂态过程

滕 弗 森 編 著

科 学 出 版 社

1 9 6 0

內 容 簡 介

本书敘述了电力系统机电暫态过程的基本概念、理論、計算方法和計算及研究工具。对电力系统受到小干扰和大干扰以后的机电暫态过程,除了有系統的理論分析外,并介紹了工程上实用的計算方法,同时对提高系統輸送能力的方法也作了論述。书中介紹了我国在这些方面的研究成果。

本书可作为电工技术人員的参考書籍,也可以作为大专学校电力系统机电暫态过程課程的主要参考資料。

电力系统 的 机电 暫态 过程

滕 菲 森 編 著

科学出版社出版 (北京朝陽門大街 117 号)

北京市书刊出版业营业許可證出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

1960 年 4 月第 一 版

书号: 2138 字数: 171,000

1960 年 4 月第一次印刷

开本: 787×1092 1/27

(京) 0001—8,000

印张: 7 21/27

定 价: 0.97 元

目 录

前言	1
第一部分 电力系统遭受微小干扰时的暂态过程	5
第一章 电力系统的功率特性和各种功率极限	5
§ 1-1. 电力系统的功率特性	5
§ 1-2. 电力系统的实际功率极限	9
§ 1-3. 电力系统的内功率极限及外功率极限	11
§ 1-4. 复杂电力系统的功率曲线	14
§ 1-5. 面积定则	18
第二章 电力系统受小干扰时的暂态过程	21
§ 2-1. 问题的提出, 基本概念	21
§ 2-2. 两个有限容量发电站组成的电力系统的暂态过程	26
§ 2-3. 复杂电力系统的暂态过程	29
§ 2-4. 不求解特征方程式的根, 确定系统稳定方法	31
第三章 自动调整励磁对电力系统静稳定的影响	41
§ 3-1. 自动调整励磁在系统受到微小干扰后所起的作用	41
§ 3-2. 计及自动调整励磁设备时, 电力系统暂态过程的研究方法	45
§ 3-3. 有电压校正器的复式励磁的电力系统静稳定的研究	46
§ 3-4. 有强作用调整励磁设备的电力系统静稳定的研究	49
第四章 电力系统静稳定的实用算法	56
§ 4-1. 基本概念	56
§ 4-2. 凸极发电机的功率特性	58
§ 4-3. 发电机铁心饱和的影响	59
§ 4-4. $\frac{dP}{d\delta}$ 判据	60
§ 4-5. $\frac{dQ}{dU}$ 判据	61
§ 4-6. 复杂电力系统静稳定的实用判据	62

第二部分 电力系统遭受大干扰时的暂态过程	65
第五章 问题的提出和基本假设	65
§ 5-1. 暂态过程的一般情况	65
§ 5-2. 研究机电暂态过程中的一些假设条件	67
§ 5-3. 各种运行情况下的功率特性	69
第六章 电力系统受大干扰时的机电暂态过程的特性(一)	72
§ 6-1. 基本概念	72
§ 6-2. 一个发电站和无穷大受端的电力系统	73
§ 6-3. 两个有限容量发电站的电力系统	78
§ 6-4. 复杂电力系统的机电暂态过程	81
§ 6-5. 计及发电机电势变化时的机电暂态过程	83
§ 6-6. 机电暂态过程中其他参数的计算	89
第七章 电力系统受大干扰时的机电暂态过程的特性(二)	91
§ 7-1. 基本概念	91
§ 7-2. 发电机失去同步后的状态,再同步	92
§ 7-3. 电力系统中发电机转差很大时的面积定则	96
§ 7-4. 异步运行的试验情况	99
§ 7-5. 异步运行的发电机重新牵入同步条件的研究	104
第八章 电力系统动稳定的实用算法	105
§ 8-1. 一般概念	105
§ 8-2. 一个发电站和无穷大受端的电力系统动稳定计算简化方法	106
§ 8-3. 电力系统发生三相短路事故,动稳定的实用算法	109
§ 8-4. 典型曲线法	110
§ 8-5. 一个发电站和无穷大受端电力系统动稳定计算的图解法	119
§ 8-6. 两有限功率发电站的电力系统动稳定计算图解法	122
第三部分 改善电力系统发生暂态过程所带来的危害性及提 高系统输电能力的方法	127
第九章 改善电力系统及其元件的特性	127
§ 9-1. 引言	127
§ 9-2. 电力系统接线方式对暂态过程的影响	128
§ 9-3. 输电线	132
§ 9-4. 发电机	141

§ 9-5. 变压器	148
§ 9-6. 开关设备	148
第十章 改善电力系统发生暂态过程特性的补充和附加方法	151
§ 10-1. 一般概念	151
§ 10-2. 变压器中性点经电阻和电抗接地	151
§ 10-3. 发电机接入负荷电阻产生制动	155
§ 10-4. 水轮发电机的机械制动	159
§ 10-5. 原动机的调整	161
§ 10-6. 输电线路采用中间同步补偿	164
§ 10-7. 自动调整功角设备——发电机纵横轴励磁	166
第四部分 研究和计算电力系统暂态过程的模型和计算设备	169
第十一章 电力系统模型	169
§ 11-1. 电力系统模型在研究暂态过程的应用	169
§ 11-2. 相似理论概述	170
§ 11-3. 交流计算台	173
§ 11-4. 电力系统的动态模型	177
第十二章 利用电子模拟计算机和电子数字计算机研究和计算电力系统的暂态过程	183
§ 12-1. 电子模拟计算机的工作原理和构造	183
§ 12-2. 利用电子模拟计算机计算复杂电力系统受到小干扰时的暂态过程和静稳定	187
§ 12-3. 利用电子模拟计算机计算复杂电力系统受到大干扰时的暂态过程和动稳定	191
§ 12-4. 电子数字计算机的工作原理和构造	193
§ 12-5. 电子数字计算机在计算电力系统暂态过程中的应用	199
附录	200
标么制	200
参考文献	203

前 言

我們祖国在解放几年来,电力系统有了很大的发展。从刚解放时年发电量为 43.1 亿度,到目前增长到 8 倍以上,尤其是最近当党提出建設社会主义的总路綫以后,全国工农业都产生了飞跃的变化。电力工业,从解放时的一些彼此孤立的小发电站单独向負荷送电的情况,发展到現在有无数的区域电力系统正在形成。最近,又要在很短的几年間,建成三峡水力枢纽和三峡动力系统。当三峡动力系统建成以后,将要用 50 万伏以上的高压輸电綫把全国各区域电力网联結起来,形成全国的統一电力系统,这样将使我国的电力工业出現更新的面貌。

当全国电力系统形成以后,电力系统的运行将是一件細致而复杂的工作。同时在設計和建成这样一个伟大的电力系统时,将要遇到很多需要解决的科学研究課題。因为,电力系统整个包含着电能的产生、傳輸、配电和用电的设备,以及各种控制元件和自动化设备。所有这些,都需要彼此很好的配合,各元件和各设备的本身都要有好的工作特性。

全国統一电力系统或各区域电力系统都需要保証在任何可能运行情况下都能运行,不管是負荷变化也好,或是系統中各元件出現故障也好,电力系统都應該很快地能够过渡到稳定的状态,繼續可靠地向負荷供电,保証工农业生产的不致于停頓。为了要达到这一点,便需要对电力系统在运行情况突然受到破坏时——如負荷的增加或减少,各元件出現故障等,是否能过渡到稳定的状态繼續送电,进行判断和作出有效的措施。这些問題,甚至于在电力系统还未建成以前,也即是在設計过程中,便需要进行研究。电力系统从某一运行情况受到破坏起,过渡到另一稳定的运行状态,或回复到原来的运行状态,这一过程,称作电力系統的暫态过程。这一

暫态过程包含着电力系统各个元件,发电机、变压器、輸电綫、負荷用电设备以至于原动机等,都在变化的过程。 电力系統的各个元件在暫态过程中将出现电和磁参数的变化,和旋轉电机的运动参数的变化。电和磁的参数的变化,如电流、电压、磁通的变化;旋轉电机的运动参数的变化,如速度和角位移的变化。因此,一般将电力系統的暫态过程分成两类:第一类,不考虑旋轉电机运动参数的变化,只考虑电力系统各元件的电、磁参数的变化过程,称为电力系統的电磁暫态过程,其中大部分的内容都在“电力系统短路”或“电力系统电磁暫态过程”中讲述。第二类是要考虑电力系統中旋轉电机的运动参数的变化对系統运行带来的影响,这一暫态过程称为电力系統的机电暫态过程,这一部分的内容包含着电力系统稳定的内容。这里需要指出,电力系統的暫态过程,是电力系统各元件,在受到扰动以后,使得从一种运行状态过渡到另一种运行状态的过程,或者是恢复到原来运行状态的过程。在这一过程中,电力系统各元件同时出现了电磁的和机械的参数变化,因此,电磁暫态过程和机电暫态过程在实际是不能分开的。分开进行研究主要是便于研究和計算工作的进行。例如,在要計算电力系统某一元件出現短路后,短路电流值的大小,和判断是否开关设备容量能够切除故障,此时,旋轉电机运动参数的变化对这一情况的影响不大,所以可以不考虑电机的机械运动情况,因而只要研究电力系統的电参数变化就可以了,所以称为电力系統的电参数暫态过程。

在电力系统所发生的暫态过程中,由于整个系統受着能量守恒定律的制約,因而除了发生电磁暫态过程以外,将产生机电暫态过程。这一过程将使原动机、調速器、发电机、补偿机、以及电动机的运动状态都要发生变化。在它們中将出現电磁能和机械能的轉換,当然在这一过程中,电力系统各元件中,也会出现电参数的变化。

电力系統的运行情况是由各节点电的参数,和旋轉电机的机械运动参数来表征的,这些参数如电压、电流、功率、頻率、功角、角速度等。电力系統的运行情况分成三种:第一是正常运行情况,电

力系統在这种情况下运行,在技术經濟上是最有利的。第二种是事故运行情况,由于电力系統的日益扩大,事故的种类也是多种多样的,最严重的一种事故就是短路,电力系統在事故情况下,它的发电、輸电、用电間的配合遭到破坏,甚至于要损坏設備,所以,不允許长期在事故情形下运行,現代的电力系統都按装有优良的繼电保护設備和自动控制設備,可以使事故很快被切除和消除。第三种是事故后的运行情况,电力系統在这种情况下,由于切除了事故的元件,消除了事故,所以,能够繼續运行,但是,技术經濟特性便变坏了。电力系統从上面所叙述的三种运行情况可以看出,从正常运行情况过渡到事故运行情况,和从事故运行情况过渡到事故以后的运行情况,就出現了暫态过程,这种暫态过程是由于电力系統发生了事故所引起的,所以称为事故性的暫态过程。

电力系統由于运行人員的正常操作,也会产生暫态过程,这种正常操作,如投入或切除变压器、綫路、調压用的电容器、或其他元件,这种正常的切换設備,改变了系統的运行結綫图,重新分配了各元件通过的功率。这种暫态过程,称为正常性的暫态过程。正常性的暫态过程一般都不会給电力系統造成很坏的结果,因为产生暫态过程的原因,对电力系統說来都是些小的扰动。

电力系統事故性的暫态过程的结果,会使电力系統造成很大的紊乱,通常就是所謂的电力系統发生失去稳定的事故。电力系統失去稳定的事故是指的电力系統中的某些同步电机,因在暫态过程中加速或減速而与其他的同步发电机失去同步,或者是电力系統中某几个节点的电压急剧变化,由于变化幅度很大,而使該控制点所帶的异步电机停頓,前者称为发电机失去稳定,后者,称为負荷失去稳定。电力系統失去稳定的事故是比較严重的事故之一,結果会使各系統解列,而造成某些地区的停电,要恢复系統的正常运行常要花很多的时候。我国某一电力系統,在过去几年間,也曾发生过这种事故,后来添加了一些提高稳定的方法如添加一回綫,远区水电站安装調整励磁設備等以后就有了很大的改善。

最近十年来,在电力系統暫态过程性质的研究,和提高稳定方

法的研究方面,有了很大成果,提出了很多提高稳定的方法,都在实际系统中采用了。因此,电力系统失去稳定的事故已经不如以前的年代那样严重了。但是,目前,我们祖国正在着手修建三峡水力枢纽和三峡电力系统。三峡水力枢纽的容量是举世无双的,三峡电力系统输电的距离和输电的容量,也远远超过现在世界上已经建成或还未建成的输电线路。为了要保证系统输送很大功率时,不会失去稳定,因此,便需要有很多提高稳定和输送能的方法。这些方法是:线路电压采用50万伏以上,线路采用分裂导线,发电机使用强作用调整励磁设备等。所以当三峡电力系统和全国电力系统建成以后,我们祖国的电力工业,将达到世界科学技术的顶峰。

最后,还要指出一点,电力系统的暂态过程除了以上所述分成电磁暂态过程和机电暂态过程以外,电力系统的暂态过程还有另外一些内容,称为电力系统的波动暂态过程,波动暂态过程的发生是由于电力系统受到内过电压和外过电压所引起的一系列电磁参数的变化,这种变化的频率常常是比较高的。有关这一部分的问题,在高压工程的书籍中专门进行讨论,就不是这一本书要讲的范围了。

本书系根据近几年来在成都工学院讲授“电力系统稳定”和“电力系统机电过程”的讲义,其中不少资料系参考苏联 П. С. 日丹诺夫(Жданов)的“电力系统稳定”(Устойчивость электрических систем)和 В. А. 维尼可夫(Виников)的“电力系统机电暂态过程”(Электромеханические переходные процессы в электрических системах)二书,书中也尽量搜集我国和其他国家在这些方面的研究成果,以便从事于这方面工作的同志们参考。

欢迎读者对本书提出意见,以便今后改正。

第一部分

电力系统遭受微小干扰时的暂态过程

第一章 电力系统的功率特性和各种功率极限

§ 1-1. 电力系统的功率特性

电力系统所发生的机电暂态过程，主要受着能量守恒定律所制约，也即是说电力系统各元件除了有电磁能量的转换以外，在各个旋转电机中，还有电磁能量和机械能量的转换过程，所以要研究暂态过程，首先就应该掌握电力系统在各种运行情况下，能够产生、传输和消耗多少功率，还要了解这些功率的特性。

先研究一种比较简单的电力系统，如图 1-1 所示。远区发电站的发电机产生的电能经过升压变压器 T_1 升压后，由线路 l 输

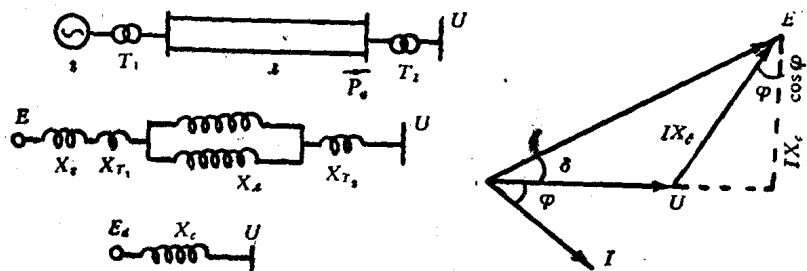


图 1-1. 电力系统的接线图、等效图和矢量图

送到受端，经过降压变压器 T_2 降压后，接到一无穷大受端，其电压为 U 。为了容易了解电力系统功率特性的特点，这里暂时忽略掉系统各元件的电阻、并联电导和电纳。实际上，这种省略，对高压电力系统来说，误差并不太大。

由远区发电站输送到受端的功率为

$$P = UI \cos \varphi.$$

由图 1-1 矢量图可以看出,

$$IX_c \cos \varphi = E \sin \delta.$$

由此可得

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

式中, E 为发电机的电势;

I 为流到受端的电流;

X_c 为系统总电抗, 为发电机、变压器、线路电抗之和;

δ 为电势 E 和电压 U 间夹角, 又称功角;

φ 为功率因数角.

(1.1) 式也可写成

$$P = EUY \sin \delta, \quad (1.1a)$$

式中 Y 为 EU 间的电导.

式(1.1)和(1.1a)中, EUY 或 $\frac{EU}{X_c}$, 以 P_m 表示之, 即

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

P_m 称为电力系统自然的功率极限¹⁾.

由(1.1)式可知, 从远区发电厂输送到受端的功率与功角 δ 有关, 称为功率特性. (1.1) 式所表示的 P, δ 之间成正弦函数的关系, 如图 1-2 所示.

若远区发电站送到受端的

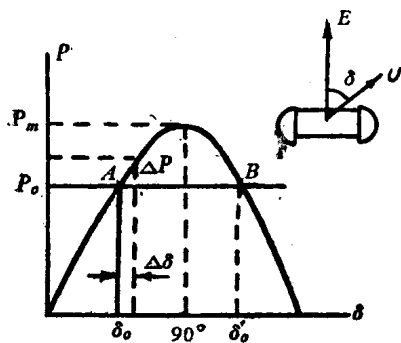


图 1-2. 功率特性曲线

- 1) 这一功率极限过去书籍中称为理想功率极限. 在现代电力系统采用了各种强作用调整励磁设备以后, 系统可能达到的功率极限已超过此值, 用“理想功率极限”已不恰当.

功率在正常情况为 P_0 ，则正常情况的功角为

$$\delta_0 = \arcsin \frac{P_0}{P_m},$$

其值就为定值。

根据功率特性，可以看出送到受端的功率 P_0 必需要小于 P_m ，电力系统才能运行；而且， P_0 水平直线（图 1-2）与功率特性曲线的交点 A 必需在功率特性曲线左半支才能稳定运行，因为假若某种原因如原动机或调速器的工作点发生变化，使 δ_0 增加 $\Delta\delta$ ，则相应送到受端的功率便增加 ΔP 。由于原动机不能立刻反映出这一功率差值 ΔP ，因而所得到的功率仍为 P_0 ，而输出的功率却增加为 $P_0 + \Delta P$ ，于是机组就要慢下来。结果使 $\delta = \delta_0 + \Delta\delta$ 减小，最后回复到 δ_0 而平衡。

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

∴ 可得
$$\frac{dP}{d\delta} > 0 \text{ 作为系统是稳定的判断。} \quad (1.3)$$

在功率特性的右半支，则会得到一种相反的结果。因为当角度从 δ_0 增加某一 $\Delta\delta$ 值时，所引起的不是输送功率的增加，而是功率的减少。这样将要导致机组更要加速， δ 角继续增加，以致于失去同步。

此时
$$\frac{\Delta P}{\Delta\delta} < 0$$

即可用
$$\frac{dP}{d\delta} < 0 \text{ 作为系统不稳定的判断。} \quad (1.4)$$

在现代的电力系统中，目前已经可以采用许多新的措施使电力系统的功率极限 P_m 提高到输电线的极限传输容量 $P_{m, \lambda}$ 。

输电线的传输容量

$$P_{m, \lambda} = \frac{U_1 U_2}{X_{\lambda}}. \quad (1.5)$$

很显然，输电线的极限传输容量 $P_{m, \lambda}$ 是大于电力系统的功率极限 P_m 。

$$P_{m,A} > P_m,$$

这是主要因为

$$X_A < X_c.$$

输电线的极限传输功率 $P_{m,A}$ 是现代研究电力系统的一个很

重要的因素。

假若线路很长时，输电线路的阻抗，不能用一简单

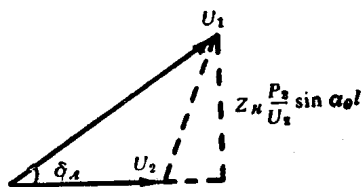
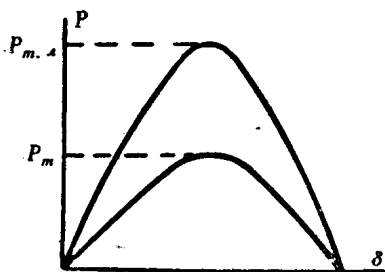


图 1-3. 输电线的功率极限功率 图 1-4. 线路以分布参数表示时的向量图

的电抗 X_A 来表示，输电线可以用一分布参数的四端网络来代替。

从理论电工可知，在不考虑线路的损失时，可得

$$U_1 = U_2 \left(\cos \alpha_0 l \pm Z_H \frac{Q_2}{U_2^2} \sin \alpha_0 l + j Z_H \frac{P_2}{U_2^2} \sin \alpha_0 l \right). \quad (1.5a)$$

从图 1.4 可见，

$$U_1 \sin \delta = U_2 \cdot Z_H \frac{P_2}{U_2^2} \sin \alpha_0 l,$$

$$\therefore P_2 = \frac{U_1 U_2}{Z_H \sin \alpha_0 l} \sin \delta_A. \quad (1.6)$$

当线路不长时(达 200—250 Kw)

$$\sin \alpha_0 l \approx \alpha_0 l = \sqrt{X_0 b_0} l$$

$$Z_H = \sqrt{\frac{X_0}{b_0}} \text{ 为波阻抗}$$

由此，

$$\begin{aligned} P_2 &= \frac{U_1 U_2 \sin \delta_A}{\sqrt{\frac{X_0}{b_0}} \sqrt{X_0 b_0} l} = \frac{U_1 U_2 \sin \delta_A}{X_0 l} = \frac{U_1 U_2}{X_A} \sin \delta_A = \\ &= P_{m,A} \sin \delta_A \end{aligned}$$

与(1.5)式相符合。

§ 1-2. 电力系统的实际功率极限

电力系统输送功率的特性，与发电机的电势 E 和受端电压 U 的乘积成正比，即

$$P = \frac{EU}{X_c} \sin \delta.$$

又当 X_c 通常为一定，(E, U 的数值也一定时)，功率极限

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

即为一定，称为自然功率极限。但在实际电力系统中，由于受端系统并不是无穷大的受端，因而在运行情况变化时，不能保持 U 的数值为恒定， U 的大小将因输送功率的增加而减少，

$$\therefore P = \frac{Ef(PQ)}{X_c} \sin \delta. \quad (1.7)$$

因此功率特性将不再是一根正弦曲线，其形状如图 1-5 所示。图中，五根功率特性曲线，代表 U 的数值为 100%、80%、60%、40% 和 20% 的功率曲线。随着输送功率的增加，运行点将要从 U 的数值较大的功率曲线上移向数值小的一根曲线，便得到一支实际

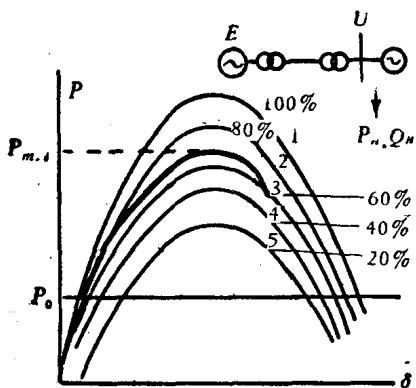


图 1-5: 实际功率曲线极限

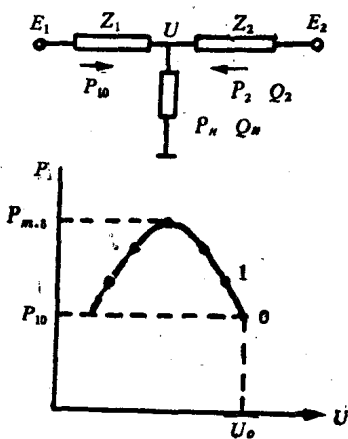


图 1-6. 实际功率极限的求得

功率曲线。其最大值 $P_{m\delta}$ 我们称为实际功率极限，实际功率极限的数值很显然小于自然功率极限。

$$P_{m\delta} < P_m.$$

要计算实际功率极限，在考虑负荷的静态特性以后，将是一件非常麻烦的工作。因为，当 U 变化以后，负荷 P_H 和 Q_H 要相应的变化，它们变化的规律可以由负荷的静态特性求得，负荷静态特性即是

$$P_H = \varphi(U),$$

$$Q_H = \psi(U).$$

知道这些关系，便可以找出实际功率曲线和实际功率极限。这种计算是由逐点计算法求得，在 P, U 图形上表示，其方法如下：

已知 $P_{10}, Q_{10}, P_{20}, Q_{20}, P_H, Q_H, U, E_1, E_2$ 均为正常运行情况的各参数，也即是要找出，在这种情况下运行时其实际功率极限数值。首先，根据已知的 P_{10}, U_0 ，可以得出 P, U 图形上的第“0”点。要找出其他各点，可按下述方法进行：

第一点：要找出 P, U 图形上的第 1 点，假设地方发电站输出的功率减少 ΔP_2 ，然后假定一系列的 Q_2 根据

$$\dot{U} = \dot{E} - \left(\frac{P_2 - jQ_2}{E_2} \right) \dot{Z}_2$$

可求出一系列的 $\dot{U}$ 值。

有了一系列的 $\dot{U}$ 值，由负荷静态特性，可以计算出相应一系列的 P_H 和 Q_H 之值。

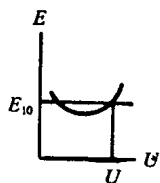
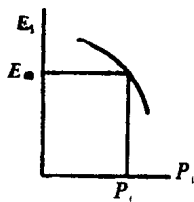


图 1-7. 实际功率极限的计算

$$用 \quad P_1 = P_H - (P_{20} - \Delta P_2)$$

$$Q_1 = Q_H - Q_2$$

可以计算出一系列的 P_1, Q_1 ，最后可以算出一系列的 E_1 。作 (E_1, P_1) ， (E_1, U) 的函数图形，从 (E_1, P_1) ，

图上已知 E_{10} ，可以查出 $P_{1(0)}$ 的数值。又从 (E_1, U) 的图形上，可以找出对应的 U 数值。于是便求得 $P_{1(0)}, U_{(0)}$ 的第一点，列表如下。

設 $P_2 = P_{20} - \Delta P$

Q_2		假設一系列值
U		由 $\dot{U} = \dot{E} - I_2 Z$ 算出
P_H		} 查静态特性
Q_H		
P_1		
Q_1		
E_1		$P_1 = P_H - P_2$
		$Q_1 = Q_H - Q_2$
		$\dot{E} = \dot{U} + I_1 Z$ 算出

根据以上的步骤可以求出很多点,然后,画出如图 1.6 所示的曲线,其最大值,即为实际功率极限 $P_{m,\delta}$ 。

§ 1-3. 电力系统的内功率极限及外功率极限

现代电力系统中的发电机,都装有灵敏的电压调整器,这种电压调整器的作用,可以保证在运行情况缓慢变化时,增加或减少励磁电流,以尽量保证发电机端电压很少变化。在这种情况下发电机的

工作状态是这样的:随着输送功率的增加,电压调整器增大了励磁电流,因而增大了发电机的电势 E ,此时电力系统能达到的功率极限称为电力系统的外功率极限。如图 1-8 中的 $P_{m,u}$ 。但在电力系统装置普通的电压调整器,由于它有失灵区域和时滞,系统的

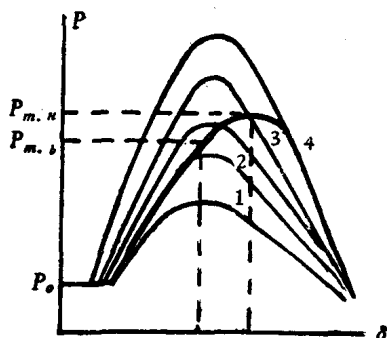


图 1-8. 电力系统的内功率极限

功率特性就不能达到外功率特性 $P_{m,u}$ 。系统的临界功角只能是 $\delta = 90^\circ$ 。因为在 $\delta < 90^\circ$ 的范围内,调整器的失灵和时滞并不会使电力系统不稳定,这是由于发电机电势虽然恒定,而功率特性曲线仍然是上升的,即满足 $\frac{dP}{d\delta} > 0$ 的条件,因此外功率极限的特性曲线(以后简称外特性曲线)和 $\delta = 90^\circ$ 直线的交点称为内功率极限 $P_{m,\delta}$ 。