第 1 章　电力系统及其控制技术概述

1.1　电力系统的组成、特点及其基本要求

电力系统是指由进行电能生产、变换、输送、分配、消费的各种设备按照一定的技术和经济要求有机组成统一系统的总称。它由发电厂、变电所、输配电线路及各种用电设备组成。电力系统中的各类发电厂，包括水力发电厂、火力发电厂、核电厂等，将水利、燃料、核能等一次能源转换成电能，再通过高压变电所、输电线路和低压变配电所以及配电线路传送并分配到各用电设备，从而实现电能从生产到消费的过程。为了确保电力系统的安全、可靠运行，电力系统还包括继电保护、自动装置、通信、调度自动化及自动监测和控制系统等设备。

1.1.1　电力系统组成的特点

电能的生产、输送、分配具有以下特点：

(1) 电能不能大量存储

电能的生产、变换、输送、分配、消费是在同一时间内进行的，是不能贮藏的，即发电厂每时每刻生产的电能取决于同一时刻用电设备消费的能量与输送、分配中损耗的电能之和。这是电能生产的最大特点。这个特点要求在运行时保持电源和负荷之间的功率平衡。另外，由于发电和用电同时进行，因此电力系统的各个设备环节之间具有十分紧密的相互依赖关系。不论生产和变换能量的原动机、发电机还是输送、分配电能的变压器、输配电线路以及用电设备等，只要其中的任何一个元件设备发生故障，都会影响电力系统正常工作。考虑到能量不能存储的特点，电力系统在运行中还需要注意经济、有效、合理地使用电能，以节约能源。

(2) 电能生产与国民经济各部门的关系密切

由于电能与其他能量之间转换方便，适宜进行大量生产、集中管理、远距离输送、自动控制，使用电能较使用其他能量有显著优点。因此，现代工业、农业、交通等各部门都广泛使用电能。电能供应的中断或减少都将影响国民经济的各个部门工作的进行。

(3) 过渡过程十分短暂

电力系统中电和磁是相互联系在一起的，任何一处发生的电磁变化过程，都会以光速传播而影响整个电力系统，所以电力系统运行中发生突然变化所引起的电磁方面的变化过程是极其迅速的。电力系统中的正常操作，如变压器、输电线路的投入运行和切除都是在极短时间内完成的；电力系统中出现的故障，如雷击引起线路闪络、导致相间短路或接地故障以及运行人员误操作造成发电机误跳闸等，都是在一瞬间完成的。因此在电力系统中要求进行快速控制和快速排除故障，否则将危及整个电力系统的安全稳定运行。

随着我国经济建设的发展，电能需求迅速增加，电力系统的规模也越来越大，电力系统已跨越省区，形成了“联合电力系统”。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

联合电力系统具有下列优点：

(1) 可以减少系统中的总装机容量

由于联合电力系统跨越地域广大，各地最大负荷的出现时间不尽相同，因此，系统的综合最大负荷常小于各个发电厂单独供电时各最大负荷的总和。由于系统综合最大负荷的降低，相应地可减少系统中的总装机容量。

(2) 可合理利用动力资源，实现经济运行

联合电力系统可以充分利用水力资源，在丰水季节可多发水电，以节省燃料；在负荷较轻时，则可停止运行效率低、成本高的火电厂。在正常运行时，可合理组合各类发电厂，使负荷在各发电厂间得到最佳的经济分配。

(3) 有利于安装大容量机组，提高劳动生产率

对于小型电力系统，单机组容量不能过大，否则一旦发生故障，对系统影响很大，严重时会使电力系统不能正常运行。因此对于大型联合电力系统，从经济上考虑，可以安装大容量机组，以节省运行费用，机组运行后效率也会很高。

(4) 可以减少备用容量

由于设备的故障或检修，电力系统需要一定的备用容量。由于各地区设备同时发生故障时的概率较小，所以可以通过合理安排检修，使系统总的备用容量减少。

(5) 可提高供电可靠性及电能质量

由于电力系统容量的增大，当系统的一部分发生故障而被切除时会对全系统的影响变小。另外，由于系统间的联系加强，各个地区之间功率可以互相支援，使用户停电概率降低，提高了用电的可靠性及电能质量。

但是，电力系统容量的增大，也会带来一些问题：

①由于各地区系统之间联系的设备都是超高压设备，一次投资费用增大。

②电力系统结构将变得复杂，运行难度增大。当发生局部故障时，若处理不及时或不正确，事故将会扩大以至危及整个电力系统的安全，从而带来严重的后果，因此，对自动化控制水平要求很高。

③由于电力系统容量的增大，等值并联回路数增加，系统一旦发生故障，故障电流也会相应增大，并且会增大对通信线路的干扰。

随着电力系统运行水平的提高、自动化设备性能的改善以及新技术的应用，特别是计算机技术、通信技术、控制理论及信息处理技术的高速发展和应用，上述缺点正在逐步被克服。目前，世界上电力系统的发展趋势是：规模越来越大，使用的电压等级越来越高，单台发电机容量越来越大，已形成跨国的大型电力系统。目前，世界上最大电力系统容量已超过 100 000 MW ,输电距离超过 1 000 km ,最高输电电压达 1 000 kV 以上，最大发电机设备容量已超过 1 000 MW。我国目前最大的电力系统容量已超过 10 000 MW,最高输电电压 500 kV，最大发电机设备容量已超过 600 MW。发电量和装机容量均已位居世界第二，全国已形成五个跨省电网、五个独立省网和一个南方联营电网。不久将建成以三峡电网为中心的全国性联合电力系统。

1.1.2 电力系统的基本要求

电力系统的上述特点以及电力工业在国民经济中的地位和作用，对电力系统提出了

下列基本要求：

(1) 保证供电的可靠性

电力系统对用户供电的中断将使生产停顿，生活发生混乱，甚至会危及人身、设备的安全，形成严重的后果。造成供电中断的原因很多，可能是由于电力系统中某些元件设备发生故障(如绝缘击穿导致的短路、雷击、误操作等),也可能是由于系统中各发电厂之间并联运行的稳定性遭到破坏而引起系统运行的全面瓦解。保证供电可靠性的主要措施有：提高电力系统及电气设备的可靠性指标；提高系统运行的稳定性；利用计算机对电力系统运行进行安全监视和控制等。

由于用户对供电可靠性的要求不一样，供电中断造成的后果是不一样的。因此，必须根据实际情况区别对待。对于某些重要用户(如连续生产的化工厂、冶炼厂和矿井等),由于停电会带来人身危险、设备损坏和生产大量废品等后果，所以在任何情况下都必须保证供电不发生中断。对其他不重要的用户则可以允许不同程度的短时停电。通常，根据用户对可靠性的要求，可以将用户分为三类：

①一类用户　对这类用户如果停止供电，就会带来人身危险，设备损坏，生产大量废品，将长期破坏生产秩序，给国民经济带来巨大损失。

②二类用户　对这类用户如果停止供电，就会造成大量减产，使人民生活和城市公用事业受到影响。

③三类用户　指不属于第一类、第二类的其他用户，一旦短时停电不会带来严重后果,比如工厂附属车间的用电,小城镇、农村的用电等。

当系统发生事故,出现供电不足情况时,首先应当切除三类用户的用电,以保证一、二类用户的正常用电。通常，对一类用户中需要设置两个或两个以上的独立电源，以便在任何一个电源发生故障时，对用户的供电都不致造成中断。

(2) 保证良好的电能质量

电压和频率是两个主要的电能质量指标，也是供电设备以及用电设备设计和制造的主要技术参数。电力系统的运行电压和频率超过允许的偏移值会影响设备的安全运行，并可能造成供电设备和用电设备的损坏。我国规定，供电电压允许的偏移值是额定值的 $+5\%\sim-7\%$,额定频率值是 50 Hz,允许的偏移是 $\pm0.2\sim\pm0.5$ Hz。整流负荷的大量出现，对电力系统的波形产生了较大的影响，会使波形发生畸变，影响电气设备的安全和运行，同时也会对通信和广播电视线路造成干扰，对此要特别加以重视。

(3) 保证电力系统运行的经济性

电力系统消耗的能源在国民经济能源总消耗中所占比重很大。因此，在保证电力系统安全可靠发电、供电以及电能质量达到一定指标的前提下，应当合理安排各类发电厂所承担的负荷,力求降低能源消耗、发电厂自身用电的消耗(厂用电率)以及电力网的输配电功率损耗，以获得最大的经济效益。

1.2　电力系统事故产生的原因及后果

1.2.1　事故的产生

电力系统是由发电机、变压器、输变电线路及各种用电设备组成的。要保证电力系

统安全正常工作，必须满足两点基本要求：一是所有电气设备处于正常状态，能满足各种运行工况的需要；二是系统的电压和频率应保持在规定的范围内，并且所有发电机保持同步运行。

电力系统内的事故原因是多方面的，自然灾害、设备缺陷以及人为因素都会造成设备事故。例如，变压器绝缘损坏会导致内部故障或套管击穿，运行人员误操作会造成发电机误跳闸，雷击引起线路闪络会导致相间短路或接地故障等，这些事故统称为系统的电气元件事故。在整个事故过程中或事故后，如果系统运行指标异常或遭到破坏，比如，系统电压或频率发生异常甚至崩溃，系统发生严重振荡甚至失去稳定，系统被解列以致大面积停电等，这类事故会波及整个电力系统，故称之为系统事故。系统事故的危害性远远超过电气元件的事故。电气元件事故通常由继电保护装置处理，系统事故由系统安全自动装置来控制处理。随着电力系统的容量的不断增加和区域联网的发展，系统事故往往会造成巨大的经济损失和人们生活的混乱。

1.2.2 由系统频率下降引起的事故和事故扩大

电力系统的频率是靠调节各发电厂中的发电机出力来保证的。当发电机输出有功功率与负荷平衡时，系统频率维持不变。当发电机出力超过负荷时，系统频率上升；反之系统频率下降。电力系统频率大幅度下降，说明发生了电源事故或系统解列事故，这是由电源与负荷不能保持平衡所造成的。通常，电力系统内部都设置有一定容量的旋转备用和低频率减负荷装置。发生事故时，旋转备用的迅速投入和低频率减负荷装置动作切除部分负荷，可以防止频率进一步下降。一般从频率开始下降至电源与负荷重新维持平衡，频率稳定到新的数值的全过程需经几秒至几十秒钟，时间非常短暂，其频率变化过程如图1-1所示。图中曲线①为系统失去电源后，有足够的旋转备用的情况；曲线②为系统失去电源后，有部分备用的情况；曲线③为系统失去电源后，低频率减负荷装置动作，切除部分负荷的情况；曲线④为系统失去电源后，系统无备用的情况。

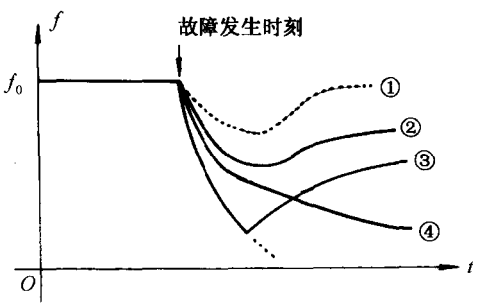


图 1-1 频率变化过程

如果频率不能尽快恢复，电力系统在低频率下运行是很危险的。这是因为电源与负荷在低的频率下的重新平衡很不牢固，稳定性很差，有可能再度失去平衡，此时频率若再度下降将引起系统内发电机低频切机，形成电源功率不足的恶性循环，最终造成大面积的停电，这种现象称为频率崩溃。

低频运行对发电厂的影响是非常大的。发电厂本身是一个非常大的电力用户，特别

是火力发电厂，频率降低将产生一系列问题，汽轮机叶片将产生振动使叶片损坏，当系统频率下降到允许的最低频率时，必须把汽轮发电机从系统中切除。发电机组的辅助设备（特别是高压给水泵）因频率下降引起的出力不足会影响到发电厂出力的降低，从而进一步使电力系统频率下降，形成恶性循环。

另外，频率的下降还将引起电网电压的降低。发电机转速的下降，使电势减小，电源无功功率输出降低，发电机输出电压必然降低，而负荷用户中广泛使用的感应电动机和同步电动机，则因频率下降而导致所需励磁用的无功功率反而增加，这样，电压将进一步下降,当系统频率降低到 43～45 Hz 时，容易产生电压崩溃。当频率下降时，旋转式的负荷的转速也将下降，这会使工厂的产品质量生产出次品，特别会对使用抽水机、鼓风机等的厂矿企业的安全造成威胁。对于电子计算机及各种自动控制设备来讲，频率下降将会引起各种误差,例如,计算机外围设备磁盘,频率偏差允许值为 ±0.5 Hz ,计算机本体频率偏差允许值为 ±1.5～±3 Hz。

因此，当系统频率大幅度下降时，迅速恢复频率至关重要。可采取如下措施恢复频率：①迅速投入电力系统中的旋转备用，使频率尽可能恢复到正常值。②迅速启动备用发电机组。由于电力系统中的水轮发电机启动迅速，调节快捷，因此迅速投入水轮发电机是恢复频率的有效措施。水电厂装设的水轮发电机低频率自启动装置，能在几十秒钟将发电机与电网并列。另外，电力系统中其他发电机例如燃油发电机、燃气轮发电机，启动速度较快，也应该立即启动投入电网中。③当采取上述方法不能恢复正常频率时，应及时切除部分用户负荷以便使频率尽快恢复。

1.2.3 由系统电压下降引起的事故和事故扩大

电力系统的电压水平是依靠系统无功功率电源来维持的。当电力系统中无功电源短缺时，电网电压将大幅度下降。此时，当某些枢纽变电所的母线电压遇到一定的扰动时，瞬间将会引起静态稳定的破坏，形成所谓电压崩溃，如图 1-2 所示。这是一种将导致系统瓦解的灾难性事故，此时系统中大量的负荷电动机将停止转动，大量发电机组将甩掉负荷，甚至导致电力系统发生振荡。

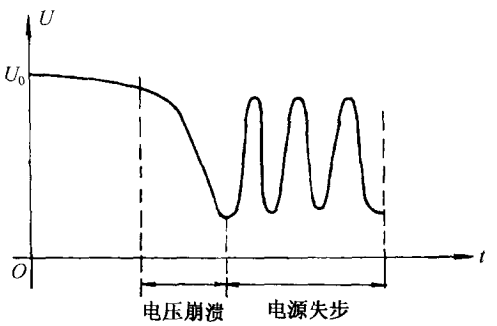


图 1-2 电压崩溃过程

电压降低到发生电压崩溃常常需要一段时间。系统电压降低时，发电机的定子电流将因其功率角的增大而增大，如果发电机的定子电流原已达到额定值，则电压降低后，将

需要全本请访问 www.ertongbook.com

使定子电流超过其额定值，为使发电机定子绕组不致过热，将不得不减少发电机所发出的功率。同理，系统电压降低后，也必须减少输电和配电变压器的负荷。

当电力系统电压降低时，负荷中的异步电动机各绕组中的电流将会增大，温升将增加，效率降低，寿命会缩短。同时，电动机的启动过程将大为延长，可能导致温度过高而使电动机烧毁。所以当电压下降但尚未达到电压崩溃时，应该尽快采取一切可能的方法提高电力系统的电压水平。例如：① 迅速调节发电机的自动励磁调节装置和强行励磁装置，以防止电力系统电压的进一步下降；②尽快启动发电机和调相机的热无功备用容量，如果有备用发电机组应该迅速将其投入运行；③ 如果上述措施无法实现或没有效果时，应该尽快切除电力系统中电压最低点处的用电负荷。

1.2.4 由系统稳定破坏引起的事故和事故扩大

电力系统在正常运行时，所有发电机的转速（频率）均应相同。也就是说，各台发电机之间应该相互保持同步运行，各台发电机机端电压之间的相角差也应该保持恒定，且小于90°。当电力系统发生稳定破坏时，各台发电机组将会失去同步，在失去同步运行的发电机之间，电力系统中有功功率和无功功率都将在一瞬间流入，而在另一瞬间流出；发电厂及变电所的母线电压幅值，将会由小到大交替变化；各台发电机组之间的电压相角差，会在0°到360°之间周而复始地变化。各台发电机间失去同步，在其所连接输电线路上各点的电压，将作周期性的变动。如图1-3所示，在电气中心这点(图中 O 点，称为振荡中心)的电压 U_0，将会出现周期性为零的现象，此时相当于在振荡中心反复出现三相短路，这种现象将会导致事故的进一步扩大。例如，当振荡中心有重要用户负荷时，由于母线电压周期性大幅度降低，将会导致这些负荷自动被切除或破坏负荷的稳定性。

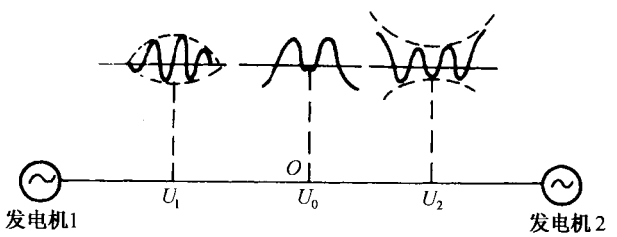


图 1-3 线路各点电压状态变化

一旦发电机失去同步，特别是送端的发电机，其转速将会急剧上升，当转速超过发电机过速保护整定值时，发电机出口断路器会自动跳闸并停机。此时，会使电力系统缺电情况更加严重。对于接收功率的负荷受端系统，必须及时切除一部分重要用户，如果切除负荷的容量较小或动作不及时，将造成系统频率持续大幅度下降。在联合电力系统中，局部系统稳定性的破坏，将会引起整个电网连锁性的稳定破坏，电力系统可能被解列为若干个电源功率不足的局域网和电源功率过剩的局域网，对电源功率不足的局域网，会造成切除大量负荷，或出现频率下降；对电源功率过剩的局域网，会出现频率过度的升高，致使部分发电机组被切除。

1.2.5 由电力线路过负荷引起的事故和事故扩大

在电力系统的正常运行中，可以通过调整发电机组的出力或通过切换变压器和输电线路改变网络结构等手段来调节电力网中的功率分布。但是，在事故情况下，故障线路和电气设备的切除是靠继电保护自动装置进行的。此时，由于功率会在输电线路中重新分配，有些线路和电气设备就可能过负荷。例如，对于双回路输电线路，因故障被切除一回时，剩下一回输电线路就有可能过负荷。线路如果超过继电保护整定值后，将会引起第二条输电线路跳闸，事故会进一步被扩大。

输电线路的正常安全输送功率一般由动态稳定极限和静态稳定极限确定（详细内容请阅读第 2 章）。当输电线路在规定的静态稳定极限值运行时，输电线路已承受不了较大的功率波动，负荷有较大幅度的增加和减少，或系统发生不同类型的故障，都会使稳定遭到破坏。当输电线路的输送容量在动态稳定极限值运行时，若发生严重的故障或故障切除时间较长，也会引起稳定破坏。因此，输电线路不论在静态稳定极限或动态稳定极限下运行，都会处于紧急状态，应当尽量避免。

1.3 保证电力系统安全运行的控制原则

电力系统的运行状态直接影响到电网的实际安全水平，因此要提高电力系统供电的可靠性，就必须十分注意安全运行的控制问题。

1.3.1 电力系统安全控制状态

电力系统的运行控制可以用等式约束条件和不等式约束条件来描述。等式约束条件是指电力系统发出的有功功率和无功功率应该在任一时刻与各个用户的有功负荷和无功负荷（当然也包括了线路及其他电气设备的有功损耗和无功损耗）相等。这一特点可用下列数学公式表示：

$$\sum P_{Gi} - \sum P_{Dk} - \sum \Delta P_L = 0 \tag{1-1}$$

$$\sum Q_{Gi} - \sum Q_{Dk} - \sum \Delta Q_L = 0 \tag{1-2}$$

式中 P_{Gi}, Q_{Gi}——第 i 台发电机或其他电源设备发出的有功功率和无功功率；

P_{Dk}, Q_{Dk}——第 k 个负荷的有功功率和无功功率；

$\Delta P_L, \Delta Q_L$—— 电力系统中各种配电和输电线路及设备的有功功率和无功功率损耗。

不等式约束条件是指要求供电质量和安全运行的某些参数（如母线电压、线路潮流功率）应该处于系统或设备安全运行的允许范围之内。这可以用下列数学公式表示：

$$\begin{aligned} U_{i\min} &\leqslant U_i \leqslant U_{i\max} \\ P_{Gi\min} &\leqslant P_{Gi} \leqslant P_{Gi\max} \\ Q_{Gi\min} &\leqslant Q_{Gi} \leqslant Q_{Gi\max} \\ S_{ij\min} &\leqslant S_{ij} \leqslant S_{ij\max} \\ f_{\min} &\leqslant f \leqslant f_{\max} \end{aligned} \tag{1-3}$$

式中 $U_i, U_{i\max}, U_{i\min}$——母线电压及其上、下限值；

$P_{Gi}, P_{Gi\max}, P_{Gi\min}$——发电机有功功率及其上、下限值；

$Q_{Gi}, Q_{Gi\max}, Q_{Gi\min}$——发电机无功功率及其上、下限值；

$S_{ij}, S_{ij\max}, S_{ij\min}$——输电线路和变压器的视在功率及其上、下限值；

$f, f_{\max}, f_{\min}$——系统频率及其上、下限值。

根据电力系统不同的运行条件，可将运行状态分为五种：正常状态、预警状态、紧急状态（事故状态）、系统崩溃、恢复状态（事故后的状态）。随着运行条件的改变，电力系统将在各种状态之间进行转变，如图 1-4所示。

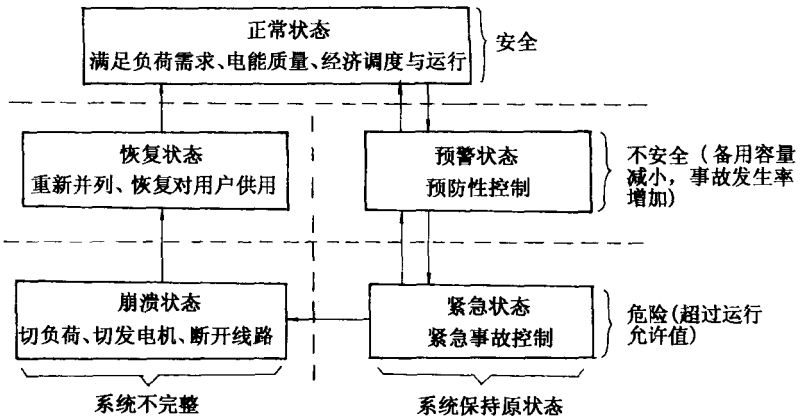


图 1-4　电力系统运行状态转换框图

电力系统安全控制就是要积极采取各种控制措施和手段，使电力系统运行处于正常状态。

(1) 正常状态

电力系统在正常运行时，均应满足等式约束条件和不等式约束条件，这才能保证电力系统在数量和质量上都满足用户对电能的需求。这些约束条件包括发电机、变压器和线路，甚至开关和互感器等有关的发电设备和输变电设备都应该处于运行容许值的范围内，各母线电压和系统频率均应该处于允许的偏差范围之内。同时，正常运行状态下的电力系统，其发电设备和输变电设备还应该保持一定的备用余度，使电力系统具有一定的安全水平并能够承受正常的干扰（如电力负荷的随机变化和设备的正常操作等），而不会使电力系统安全水平受到影响。另外，在保证安全的条件下，电力系统可实行各种方式的经济运行以提高电网的运行效率。电力系统经常性的小负荷变动属于正常情况，可以认为是电力系统从一个正常状态连续变化到另一个正常状态的过程。

(2)预警状态

预警状态与正常状态的差别在于安全水平的不同，前者是欠安全的，后者是安全的。从正常安全状态转入预警状态的原因是由于发电机、变压器、输电线路运行环境的恶化，或发电机计划外检修，使电力系统中各电气元件的备用容量减少到安全运行的最低限。处于预警状态下的电力系统，尽管仍然可以满足等约束条件和不等约束条件，系统也能够提供质量合格的电能，但是系统的安全已经下降到很低的水平，这时系统已不能够承受各种正常的干扰，一旦发生干扰，就有可能不满足某些不等约束条件，例如某些线路和变压

器过负荷、某些母线电压低于下限值等。这时，应该采取积极控制措施，调整负荷的合理配置，切换线路，改变和调整发电机功率，使电力系统尽快恢复到正常状态。

(3)紧急状态

处于正常状态和预警状态的电力系统，如果发生了严重的干扰，例如，一台主要大容量发电机非正常退出工作或一条主要输电线路发生短路，系统将进入紧急状态。此时，等约束条件可能仍然得到满足，即负荷功率仍然可以得到满足，但是，电能质量（频率或电压）已无法达到合格的标准，某些不等约束条件会遭到破坏，例如某些母线电压会低于其下限值、某些输电线路或变压器过负荷等。上述不等约束条件遭到破坏，可能会使还在运行的其他设备承受不了过电压、过负荷、低周波、低电压，使事故进一步扩大。此时，如果采取有效的紧急控制措施，解除一些设备的越限运行状态，系统就可能恢复到预警状态或正常状态。

(4)崩溃状态

电力系统中如果发生事故，正常运行将会遭到破坏，此时如不及时排除故障和采用适当的控制措施，或者这些措施不能产生效果，则电力系统就有可能失去稳定。为了缩小失去稳定的范围，电力系统中的自动解列调节装置和调度人员的有效操作将使电力系统解列成几个子系统，这时等式约束条件和不等式约束条件均会遭到破坏，发电机发出的功率与负荷消耗的功率出现不平衡。在一些子系统中由于电源功率不足，不得不大量切除负荷；而在另一些子系统中，由于电源功率远远超过了负荷的功率，会迫使部分发电机组退出运行。系统解列后的各子系统可靠性降低。此时应尽量使各解列后的系统维持部分供电，以避免全系统的彻底崩溃。

1.3.2 电力系统安全控制原则

电力系统的安全控制，简单地说，就是尽可能地使电力系统处于“正常状态”。计算机控制技术在电力系统安全控制中发挥着越来越重要的作用。它的作用主要包括三个方面，一是安全监视的功能，二是安全分析的功能，三是安全控制（或称安全操作）的功能。安全监视是对电力系统运行状态安全情况所进行的监视；安全分析是对电力系统的运行安全水平进行评价并确定系统免遭事故破坏的能力；安全控制是故障发生瞬间迅速作出判断和控制，使系统故障及早得到抑制和排除，以最大程度地提高系统的安全性。

1.3.3 电力系统计算机分层控制

随着计算机技术、通信技术、控制理论及信息处理技术的发展和使用，电力系统安全控制的自动化程度也越来越高，以计算机为主体的数据采集和监控系统（SCADA，Supervisory Control And Date Acquisition）已广泛在电网中使用。随着电力系统各电气设备及发电厂组成的日益复杂化，以及对控制要求的提高，如果把全系统中所有发电厂及变电所的信息全部采集到中央调度所进行处理，然后再把处理后的信息送回到各发电厂和变电所中，将会出现信息量庞大、通道拥挤、对计算机的容量要求增大、相应速度变慢、运行复杂等一系列问题，这在技术上和经济上都是不可取的。由于计算机性能价格比日益提高，可以对较分散的需要监控的大量信息采用分层控制，即设立中心调度所、地区调度所、发电厂（变电所）控制中心等分层控制中心。如图 1-5 所示。

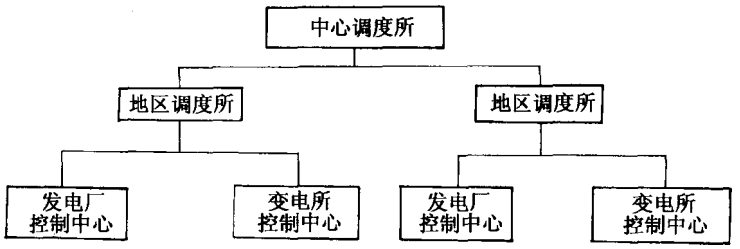


图 1-5　电力系统分层控制

分层控制后，凡涉及全系统的综合信息，都由中心调度所收集和控制处理。其余局部地区的信息，由各级地区调度所及厂所控制中心处理，各级的控制内容如表 1-1 所示。

表 1-1　分层控制

控制级	控 制 内 容
中心调度所	对整个电力系统作出综合判断及控制，负责与地区调度所和发电厂及变电所保持信息交换和控制
地区调度所	接受中心调度所的控制指令，对本地区的系统作出综合判断和控制，对发电厂及变电所控制中心进行信息交换和控制
发电厂（变电所）控制中心	接受中心调度所或地区调度所的指令，直接对所属机组和设备进行监视及控制

按照这样的分层结构，发电厂及变电所控制中心可以就近获得数据信息并进行控制，避免大量信息来回传送，减轻上层控制装置和计算机的负担，提高信息处理的实时性。只有涉及全系统的综合性信息，才由下一层传送给上一层处理和控制，在上一层作出决策后向下层发送控制信息。

1.3.4　电力系统调度（控制）中心 SCADA 系统

计算机技术、通信技术、自动控制技术是推动电力系统安全控制向前发展的决定性因素，它们使电力系统的安全控制由最简单的人工监视发展成为计算机监控。为了合理监视日益扩大的电力系统的运行状态，及时处理影响整个系统正常运行的事故和异常现象，电力系统调度（控制）中心必须采取远方监视和控制以及通信技术手段来掌握电力系统的运行状态、信息，包括各发电厂和变电所以及输电线路的运行参数。运动技术和通讯技术的发展，使电力系统大量的实时信息进入了调度中心，调度人员可根据这些信息迅速掌握电力系统的运行状态并能及时处理事故。图像显示技术在电力系统安全监视的应用使自动控制程度达到了一个新的水平。计算机与相应的远动装置及通信设备组成的系统，主要用来完成电力系统运行状态的监视（包括信息的收集、处理和显示）、远距离开关操作、自动发电控制及经济运行，以及制表、记录和统计等功能（SCADA）。调度（控制）中心分层结构如下：

1．集中控制

当被控发电厂和变电所数量较少时（一般不超过 10 座变电所),一般可采取由中心调度所对变电所（厂）的直接控制，即 SCADA 主站系统与变电所自动化系统之间直接进行上下行通信，并完成各项远动任务。这种情况下，调度员将直接面对变电所进行远动操作。

2．分层(级)控制

如果地区被控变电所（厂）的数量较多时，宜采用中心调度所一地区调度所一变电所控制中心（厂）分层控制结构，这与调度自动化系统的信息流分层传送原则是一致的。控制方式是先由中心调度所的调度员对地区调度所值班员下达操作命令，然后再由地区调度所操作员对所辖变电所实施远动操作。在一些地区变电所较为集中但远离地区调度所时,通常可采取‘集控站辐射卫星站’的控制结构,即由集控站运行人员接受地区调度所下达的操作命令，然后再由它所辖的卫星变电所实施远动操作。

在分层控制情况下，地区调度所的 SCADA 系统除了与下一层变电所自动化系统进行上下行通信、完成各项远动任务外，还必须向上层中心调度所 SCADA 系统转发所需要的信息。同理，集控站除了与所辖卫星变电所自动化系统进行上下行通信、完成各项远动任务外，同时还将向地区调度所转发所需信息。分层控制结构示意图如图 1-6 所示。

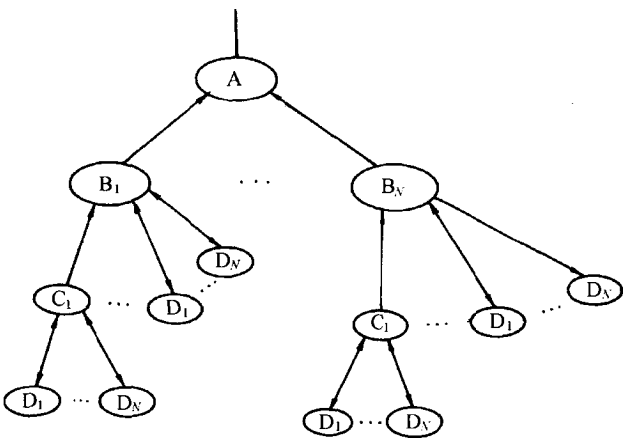


图 1-6　分层控制结构示意图

A——中心调度所(SCADA 主站系统）；B——地区调度所(SCADA 主站系统）；

C——集控站(SCADA 主站系统）；D——被控变电所（变电所自动化系统）

为确保中心调度所 SCADA 主站系统的可靠性，可以选用局域网络结构，并且系统主机及 SCADA 工作站、通信处理机应为双倍冗余配置。当控制中心设置在区调（县调）时，原有区调（县调)SCADA 主站系统在满足调度自动化系统实用化要求的前提下，应进行控制功能的完善。新建调度自动化 SCADA 主站系统时，为便于管理且节省投资，区调（县调）的调度管理功能和操作控制功能宜在同一套 SCADA 系统中完成。SCADA 主站系统中可分别设置调度和操作控制专用工作站，以便于管理和使用。最好在同一控制区域内，

需要全本请访问 www.ertongbook.com

尽量统一通信规约，以减少 SCADA 总站系统的前置机信息处理的负担和维护工作量。

系统除了应具有与上级调度 SCADA/EMS(能量管理系统）系统进行数据通信的接口外，还应留有与调度（控制）中心模拟屏的串行通信接口。系统必须具有毫秒级的分辨率的校时系统以利于全网时钟的统一，可以考虑选用 GPS。

人机联系系统(MMI)的各项功能与技术指标，不但应满足变电所自动化系统中对 MMI 的要求，还应该满足调度自动化系统总体要求的其他内容。特别要求提高系统的可靠性、数据和操作的安全运行，不仅应配置 UPS，而且必须具有可靠的接地系统。

随着电力系统控制水平的要求不断提高，为了确保电力系统安全运行，要求加强对全系统的安全监视、分析和控制。这样，不仅能够完整地了解掌握全系统的实时状态，同时还能在正常和事故的情况下及时而正确地作出控制和决策。这些包括数据采集和监控系统功能、安全分析与控制功能以及其他调度管理和计划功能的系统被称为能量管理系统 EMS(Energy Management System)。EMS 的使用已使电力系统自动监视和控制水平得到了较大的提高。

电力系统调度（控制）中心由以下系统组成：

(1) 信息收集和执行系统

收集由各控制中心（地区）调度所、各发电厂、变电所所收集到的各种信息并发送回中心调度所。在一些所（厂）设有以计算机为核心的远方终端 RTU(Remote Terminal Unit) 它们所传送的信息已经是处理和加工过的。地区调度所或变电所能够接收到中心调度所发来的操作、调节和控制命令例如操作开关、启停机组、调节功率等后，直接作用于控制机构，或者按照一定的规律将命令转发给各种被控设备。为了直接控制不同的电气设备，可采取工频、音频载波、无线电等控制手段。

(2)信息处理分析系统

它是以电子计算机系统为核心所组成的部分，用于对收集到的信息进行处理、加工、分析和计算电力系统的运行状态，为运行人员进行控制和决策，或者为直接实现自动控制提供依据。比如，对收集到的信息进行处理后，可以对电力系统的运行状态进行实时鉴别，以确定系统属于正常状态、预警状态、紧急状态、崩溃状态或者是恢复状态。当系统处于预警状态时，确定哪些控制措施可以使系统返回到安全正常状态，如果没有可行的安全措施，应该能够提供下一个事故发生时系统可能面临的紧急状态，即哪些输电线路会过负荷、哪些母线可能过电压等信息。当系统处于紧急状态时，确定哪些反事故措施可以使系统恢复到正常状态，或者提供紧急操作信息。分析计算包括频率和电压安全分析计算、经济调度计算、安全监视和安全分析计算等，除此之外，还可用于完成日发电计划编制、检修计划编制、统计计算等。

1.3.5 发电厂变电所控制

现代火电厂大多采用高温、高压、中间再热式大型单元式发电机组，机组的单机容量大且热力系统复杂，其运行工况多变、控制参数多，传统的监控仪表已满足不了火电厂对自动控制提出的要求。随着计算机技术以及测量技术的发展，目前已经用计算机来代替常规仪表及局部控制系统对参数的测量及控制，如锅炉自动控制、汽轮机自动启动、发电机自同步等。其主要控制作用包括：

(1) 安全监视

利用计算机对发电机组的各种参数和各类设备的运行状态进行巡回和周期性的测量和检查,包括不同的运行工况(如正常、异常、事故、启停过程),并通过声光显示或打印输出向运行人员报告,同时可以根据获得的数据进行计算,得出总的有功、无功功率、锅炉效率、厂用电率等的性能指标。

(2) 正常调节

在正常运行时，对锅炉、汽轮机、发电机等主要设备和辅助设备进行直接或间接控制，对一些经常被调整的参数(如水位、气压、流量、风量等)采用自动调节器,按规定的调节规律进行调节。

(3) 机组启停

大容量多参数发电机组的热力燃烧系统、辅助系统、除氧给水系统十分复杂，启停过程控制十分困难，从启动开始到带满负荷需要几个小时到十几小时，这个过程包括锅炉点火、升温升压、汽轮机升速、负荷保持、升负荷等几个阶段,运行工况变化非常大。为了保证设备的安全，发电厂控制系统要对各种参数和设备状态进行监视、分析和计算，然后作出判断，最后对各调节器和各控制回路发出控制指令或直接调节和控制操作执行机构。

(4)事故处理

发电厂控制系统可以对生产过程进行故障分析预报，事故发生后，能够通过事故识别程序查明事故的性质及原因，然后转入相应的事故处理程序。如果事故非常严重，以致危及发电机组及系统安全时，应采取紧急措施（比如减负荷、停机等）。在事故处理过程中，要监视和记录设备运行状态及主要参数，以便提供给运行人员进行事故后分析。

现代变电所自动化应用控制技术、信息处理和通信技术，通过计算机软、硬件系统或自动装置代替人工进行各种运行操作，是提高变电所运行、管理水平的一种自动化系统。变电所自动化的内容包括综合自动化技术、远动技术、继电保护技术及变电所其他智能技术等。

变电所控制技术是将变电所的二次设备(包括控制、信号、测量、保护、自动装置及远动装置等)利用计算机技术、现代通信技术,经过功能组合和优化设计,对变电所执行自动监视、测量控制和协调的一种综合性的自动化系统。它是变电所的一种现代化技术装备，是自动化和计算机、通信技术在变电所领域的综合应用。变电所综合自动化可以收集较齐全的数据和信息，通过计算机高速计算能力和判断功能，可以方便地监视和控制变电所内各种设备的运行及操作。变电所综合自动化具有功能综合化（综合程度因不同的技术而异),设备、操作、监视微机化(包括信息数字化内容),结构分布分层化,通信网络光纤化及运行管理智能化的特征。它的出现为变电所的小型化、智能化、扩大监控范围及变电所安全可靠、优质经济运行提供了现代化的手段和基础保证。它的应用为变电所无人值班提供了强有力的现场数据采集及监控支持。

变电所控制主要任务是保证、安全、经济供电,使用户得到充裕、优质、廉价的电力供应。其主要功能为:①对变电所所管辖的配电网实行监视和自动操作，如通过投切配电网中的联络开关和分段开关，切除故障或调整功率分布；②在系统频率下降时,切除负荷,或者在电压变动时自动投切静电电容器或者调整变压器分接头；③通过对负荷的直接控制来调节负荷曲线和保持电能的供需平衡。

较为简单的控制是根据上级调度所发出的指令，直接发出控制信号，操作被控用户的开关。另外，控制用户的负荷可采用定时切换用户，采取控制最大用电量、分时计价、按合同规定时间用电等方法来控制负荷。

随着自动控制装置和自动化技术的提高，中小型变电所控制已逐步由就地操作改为自动操作和远方操作，建立了以微机为基础的综合自动控制系统，实现了继电保护、安全监视、电压和无功综合控制等功能。变电所已实现了无人值班或远方控制的自动控制方式。

现代电网的安全、优质、经济运行要求电网调度（控制）和管理的现代化。随着电力工业的发展，电网调度自动化已越来越受到重视，目前已经成为电网赖以维持运行不可分割的重要组成部分。而电网调度自动化系统则是实施现代电网控制和管理的重要技术支撑和物质基础。通常电网调度自动化系统（一般统称为能量管理系统或数据采集与监控EMS/SCADA)被分为 3 个大的子系统，即发电厂和变电所的基础自动化系统、信息传输(通信)系统(通道)以及调度(控制)中心 EMS/SCADA 主站计算机系统。调度自动化系统是由多个子系统组成的有机整体，缺一不可，是一项涉及范围广，实现难度大的系统工程。其中，变电所自动化是电网调度自动化不可分离的十分重要的基础自动化。只有通过变电所（厂）自动化装置和系统向调度自动化系统提供完整可靠的信息，调度（控制）中心才有可能了解和掌握电力系统（电网）实时运行状态及变电所（厂）设备工况，才能对其控制作出决策。同时，要实现调度（控制）中心的远方控制操作，也只有依靠变电所自动化装置才能完成或执行操作命令的任务。可以说，如果没有一个完整、先进、可靠的基础自动化就不可能实现一个高水平的电网调度自动化。并且，作为电网自动化系统的一个重要组成部分，变电所自动化系统的建设和运行应该严格遵循其统一的标准和原则。比如统一的技术标准、统一规划和设计以及统一纳入调度自动化系统管理和考核等。

近几年，世界上已出现了把电力系统实时运行的能量管理系统和在配电网控制中使用的调度自动化系统以及用于管理和规划的管理信息系统（MIS, Management Information System）结合起来构成的一个综合自动控制系统。这样，把不同层次的电力系统调度自动控制功能和日常的计划管理功能在功能互补上得到了很好的配置，将电力系统运行的安全性、可靠性、经济性提高到了一个新的水平。

第 2 章　电力系统稳定及其控制技术

2.1　电力系统稳定及控制的重要性

随着我国电力建设事业的发展，大容量发电厂和超高压远距离输电线路正在建设和投入运行，电力系统稳定问题更显突出。电力系统失去稳定，往往会造成大面积的停电，给国民经济带来严重损失。目前，电力系统能不能在各种情况下保持稳定运行，已成为影响电力系统安全可靠运行的重要因素。电力系统的发展给运行稳定带来突出问题的主要原因是：

①随着我国西部煤炭资源及水利资源的开发，出现了向东部沿海城市远距离输电的趋势，从减少大气污染等公害上考虑，也要求电厂远离城市。这就形成了远距离重负荷输电的局面。线路电抗和传输功率的增大以及潮流的不合理分布，都将使系统的稳定性下降。

②为了加速电力系统的发展，统一的全国性的联合电力系统必然要形成。装设大容量的发电机组已成为必然的趋势，但是单机容量的增大，会带来发电机同步电抗的增大和机组惯性时间常数的减小。这两个参数的变化都会恶化电力系统的稳定性。

③为了更多地输送功率，需要将输电导线的截面增大。这样，在大量传输功率时，一旦输电线路因事故断开，发送功率端和受电端的功率差额将变得很大，系统稳定性会遭到破坏。另外，为了提高输送功率的效率，需采用同杆架设多回路输电线路，尽管这样提高了线路走廊的利用率，但是由于多条线路架设在同一杆塔上，会增加线路间多重故障的可能性，给系统稳定性破坏带来潜在的危害。

电力系统稳定性是危机可靠供电的重大问题，失去稳定的电力系统，发电机不能正常发电，用户不能正常用电，并要引起系统运行参数的巨大变化，往往会造成大面积停电事故。随着电力系统的发展以及全国统一联合电力系统的形成，对电力系统稳定性将会提出更高的要求。同时随着计算机的应用、控制理论及信息处理和通信技术的发展，提高电力系统稳定性的控制技术及控制装置将会进一步得到发展和完善。

2.2　电力系统稳定性的基本概念

电力系统稳定性分类的问题在有关文献和教材中有不同的定义。而且，在不同的时期其分类方法也有一些变化。在 20 世纪 60 年代以前，前苏联和我国将其分为静态稳定和动态稳定；英、美等国家将其分为静态稳定和暂态稳定。自 20 世纪 70 年代起，国际上比较通用的是分为静态稳定和暂态稳定。

静态稳定是指，在一个特定的稳态运行条件下的电力系统，如果遭受到任何一个小干扰后，经过一定时间，它能够自动地恢复到或者靠近于小干扰前的稳定运行条件。其恢复能力用静态稳定储备系数来衡量。电力系统具有静态稳定，这是能够正常运行的基本条

件。静态稳定和控制理论叙述的小干扰稳定定义是相同的。

暂态稳定是指，在一个特定的稳态运行条件下的电力系统，如果遭受到一个特定的大的干扰后，能够从原来的运行状态不失去同步地过渡到新的另一个允许的稳态运行条件的能力。

2.2.1 电力系统静态稳定性

电力系统在运行过程中经常遇到各种小的扰动，例如，个别负荷线路的接入与切除或负荷大小发生的变化，在这种扰动下，系统会出现一个振荡过渡过程。当发生扰动时，过渡过程可能有两种不同的结局，一种是经过过渡过程系统仍然可以恢复到扰动前的运行状态(或者说,与扰动前运行情况的偏移无限微小而接近于零)另一种是在扰动后系统发生较大的变化而偏离了扰动前的运行状态，从而使发电机失去同步。显然，对于第一种情况，系统是静态稳定的，而第二种情况则是静态不稳定的。

为了进一步理解静态稳定性的概念，可以用图 2-1(a)所示的简单电力系统为例来加以说明。

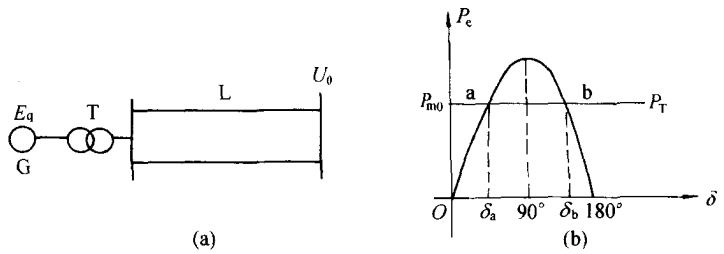


图 2-1 简单电力系统及功角特性曲线

在这个系统中，假定发电机内电势 E_q 保持恒定，受电端为一个无限大系统，其母线电压 U_0 的大小和相角均保持不变。在此情况下，送电端发电机发出的功率，即沿输电线路输送的功率 P_e 将完全取决于该发电机的转子角度 δ，当忽略发电机和输电线路的电阻和线路电容时,则 P_e 可用下式表示：

$$P_e = \frac{E_q U_0}{X}\sin\delta \tag{2-1}$$

其中,X 为发电机、变压器和线路电抗的总和。式(2-1)所给出的发电机功率与功角之间的关系称为发电机功角特性，其曲线如图 2-1(b)所示。

设在正常工作时，原动机的机械功率 P_T 为某一给定恒定值 P_{m0}，系统会有两个不同的运行点，它们分别对应于图 2-1(b)中的运行点 a 和 b。在这两个运行点上，原动机的机械功率都与发电机发出的电功率相平衡，发电机有可能维持恒定的同步转速运行。但是运行点 a 和 b，在遭受微小扰动后其过渡过程的结局是截然不同的。在 a 点，当扰动使发电机的角度获得微小增量 $\Delta\delta$ 时，发电机发出的功率将随之增大，此时发电机与原动机之间的功率平衡遭到破坏。由于这时发电机发出的电功率大于原动机的机械功率，即原动机的驱动转矩小于发电机的电磁制动转矩，结果使发电机组开始减速，其角度增量 $\Delta\delta$ 逐渐减小，经过一段过渡过程后运行又恢复到扰动前的运行点 a，使发电机与原动机间恢复

了功率的平衡。所以，在 a 点运行时，电力系统是静态稳定的。

运行在 b 点，当扰动使发电机角度获得微小增量 $\Delta\delta$ 时，发电机发出的电功率减小，发电机与原动机的机械功率平衡遭受破坏，此时发电机发出的电功率小于原动机的机械功率，即原动机的驱动转矩超过了发电机的电磁制动转矩，结果使发电机开始加速，其角度增量 $\Delta\delta$ 逐渐增大，且随着角度的增大发电机发出的功率继续减小，进一步引起角度继续增大，结果更加偏离了原先的运行情况，最终使发电机失去了同步。所以，在 b 点运行时，电力系统是静态不稳定的。

由上面分析可以看出，凡是处于发电机功角特性曲线上升部分的运行点都是稳定的，而处于功角特性曲线下降部分的运行点都是不稳定的。而 $\delta=90°$ 正处于稳定与不稳定的临界状态。显然，为了保证电力系统安全、可靠运行，不仅要求正常运行时工作点是稳定的，而且还要求工作点所对应的运行状态具有一定的静态稳定储备。稳定储备可用储备系数 K_P 来表示。

$$K_p = \frac{P_{max} - P_T}{P_T} \times 100\% \tag{2-2}$$

式中 P_{max}——$\delta=90°$ 时，稳定极限运行情况下的功率值；

P_T——原动机的机械功率。

正常运行情况下，静态稳定储备系数应当大于 15%，事故后要求不小于 5%。

根据上面在点 a 及点 b 能否稳定运行的分析，可以得出静态稳定判据：

当角度 δ 与发电机功率 P_e 的增量有相同符号时，即

$$\frac{dP_e}{dt} > 0 \tag{2-3}$$

因此是系统静态稳定的，$\frac{dP_e}{dt}$ 称为整步功率。由式（2-1），可求得

$$\frac{dP_e}{dt} = \frac{E_q U_0}{X}\cos\varphi \tag{2-4}$$

当 $\delta<90°$ 时，上式为正，在这个范围内，系统运行是稳定的，$\frac{dP_e}{dt}$ 愈小，维持同步运行的能力越低。当 $\delta=90°$ 时，运行已经达到了静态稳定运行的临界点，此时 $\frac{dP_e}{dt}=0$，如图 2-2 所示。

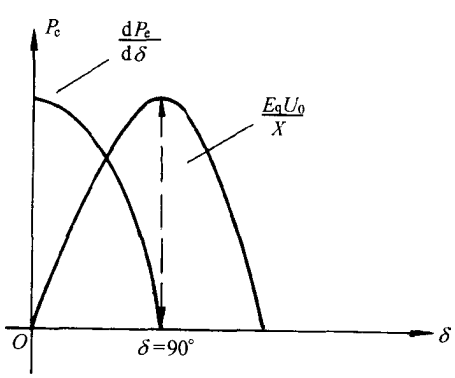


图 2-2 整步功率特性

需要全本请访问 www.ertongbook.com