

水利电力部属职工大学交流教材

# 电力系统自动装置

方慎仪 齐家寿 王雨春 合编

水利电力部属职工大学电力类专业协作组

一九八七年七月

## 前 言

本书是根据水电部部属职工大学,电力类专业协作组1985年,年会上审定和通过的《电力系统自动装置》课程教学大纲编写的,并被选为水电系统职工高等专科学校《发电厂及变电站》专业的交流教材。全书包括:同步发电机自动并列,同步发电机自动调节励磁,电力系统按频率自动减负荷,电力系统自动调频与经济调度,备用电源自动投入等五章。

本书取材时,充分地注意到成人职工高校教学的特点,着重叙述了各种自动装置的基本工作原理,结合实际装置的部分接线进行分析,可根据各校具体情况酌情取舍。

本书由重庆电力职大方慎仪,上海电业职大齐家寿,江苏电力职大王雨春合编,方慎仪主编,齐家寿主审。

在编写过程中,得到供稿单位和西北电业职大的大力支持,在此表示感谢。

由于编者水平有限,时间仓促,书中一定存在不少错误和缺点,恳切希望各职工大学的师生批评指正。以再行修改。

编者

1986年11月



郑州电专 0117655



# 目 录

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 前言                            |     |
| 绪论                            | 1   |
| 第一章 同步发电机自动并列                 | 6   |
| 第一节 概述                        | 6   |
| 第二节 准同期并列的原理                  | 13  |
| 第三节 自动准同期装置举例 (ZZQ—5 型)       | 24  |
| 第二章 同步发电机自动调节励磁               | 42  |
| 第一节 概述                        | 42  |
| 第二节 同步发电机的励磁系统                | 44  |
| 第三节 继电强行励磁和强行减磁               | 48  |
| 第四节 半导体整流电路                   | 49  |
| 第五节 半导体自动调节励磁装置原理             | 58  |
| 第六节 并列运行发电机组间无功功率的分配          | 73  |
| 第七节 相复励自动调节励磁装置原理             | 75  |
| 第三章 电力系统按频率自动减负荷              | 95  |
| 第一节 概述                        | 95  |
| 第二节 按频率自动减负荷的工作原理与各轮最佳断开功率的计算 | 98  |
| 第三节 减负荷装置                     | 102 |
| 第四章 电力系统自动调频与经济调度             | 107 |
| 第一节 概述                        | 107 |
| 第二节 调速器调频及其特性                 | 107 |
| 第三节 电力系统频率的自动调节               | 113 |
| 第五章 备用电源自动投入                  | 126 |
| 第一节 概述                        | 126 |
| 第二节 对BZTH装置的基本要求              | 127 |
| 第三节 BZTH装置的典型接线图              | 128 |

# 绪 论

## 第一节 概 述

电力与现代化的生产有着十分密切的联系，它是国民经济各部门的主要动力，因此电力生产的发展直接影响到各部门。随着工农业、交通运输业的迅速发展，对电力生产的要求越来越高。为了满足日益增长的国民经济各部门的需要，必须加速电力工业、发电设备及电气设备制造业的发展。

目前、国内外电力工业的发展趋势是采用大机组，大系统及高压输电。在许多发达国家，已基本建成国内统一电网。在西欧，中欧及东欧地区的一些国家，已建成跨国联合电网，形成装机容量达几十万兆瓦，供电范围纵横几千公里的巨大电力系统。在国内，联网工作也在进行。华北、华东、东北、中南、西北、西南及两广等七个跨省电网正在形成。联网的系统装机容量已超过1万兆瓦。这为进一步实现全国统一电力系统打下了基础。随着电力系统的不断发展，对大系统的运行提出了更高的要求。

保证系统的安全运行有着重大的意义。根据电力生产的特点，系统中的各元件联系十分紧密，任一元件的故障，都将在不同程度上影响整个电力系统的正常运行。如不能及时而正确地处理，将扩大事故，造成大面积停电，在政治上、经济上造成巨大的影响。60年代以来，国外出现了多次大面积停电事故。如1977年，美国纽约市的电力系统发生故障，由于多方面的原因，致使全系统瓦解，造成全市停电达25小时之久，带来的直接和间接经济损失约三亿五千万美元。又如法国1978年的三小时事故停电，其经济上的损失至少与50年经济调度工作所得的经济效益相当。为此，联网后电力系统的安全运行已成为共同关注的中心。

此外，对技术人员、工人的运行水平和管理水平有较高的要求。联网后，由于系统的容量增大，电网结构更加复杂，运行方式的多变以及输电线路的电压等级增多和提高，相应地继电保护和自动装置亦更加复杂，要求也越来越高。这不仅对原来的技术装备提出了新要求，同时对运行水平和管理水平也提出了新的要求。要求在短时内能掌握复杂而多变的各种运行方式，并能在事故情况下，迅速地做出正确判断，及时处理事故。并要求对系统实现经济调度与安全监控。这些若只由人工和原来技术装备去实现是很困难的。为此，必须实现自动化。

电力系统自动化主要指电力系统中各电量及非电量的测定，信息的传送，参量的调节以及电器设备的操作等均借助于某种装置自动地去完成。以达到提高电力系统安全运行，提高电能生产质量及减轻运行人员劳动强度的目的。

电力系统自动化同其它生产过程的自动化一样，包括两方面内容。一方面是自动化的共有规律，即自动控制的基础理论问题。另一方面是根据生产过程中不同的生产任务及实现这些任务所采用的具体方案。在电力系统完成不同生产任务的各种方案中包括两部分内容。一部分是常规的自动装置。这是针对电力系统某项操作和调节的自动装置。如：同步发电机的自动并列装置，自动按频率减负荷装置，同步发电机自动调节励磁装置，自动调频装置和有功功率自动分配装置等。另一部分是电力系统调度的自动化。即采用电子计算机的实时调

度，分层控制的方式来建立大规模的电力系统的自动监视和自动控制系统。本课程主要研究前一部分的内容。

## 第二节 电力系统自动监控的基本概念

电力系统中电子计算机的采用，可以连续地高速地接收和传送大量的信息，及时处理信息，并可完善地描绘电力系统。目前，世界上已有80多个系统应用了先进的通讯技术和计算机自动监控系统。因此，计算机已成为实现电力系统自动监控不可缺少的工具。

大型电力系统往往跨几个省市，具有成千个发电厂和负荷点。为了实现自动监视和控制功能，需要进行大量的数据处理，要求作复杂的电力系统运行状态分析计算和逻辑判断。因此，在现代化的电力系统中心，有以大容量、高速度的计算机为核心的自动控制系统。这种系统是由计算机及其有关的外围设备、运动设备、通道和控制器等组成。这种控制系统的结构示意图如图1所示。

在应用计算机进行实时控制时，计算机将成为电力系统运行中不可缺少的一部分，当电子计算机停止工作时，就会对全系统发生很大影响。作为提高运行可靠性的重要措施是采用多机系统。即设置几台计算机及相应的外围设备，分别承担各项监视和控制任务，并保证必要的备用。最简单的多机系统是双机系统如图2所示。比较一般的用法是，将全部功能分配给两台计算机。将重要的功能分配给A机，当A机发生故障时，B机能自动承担全部功能。

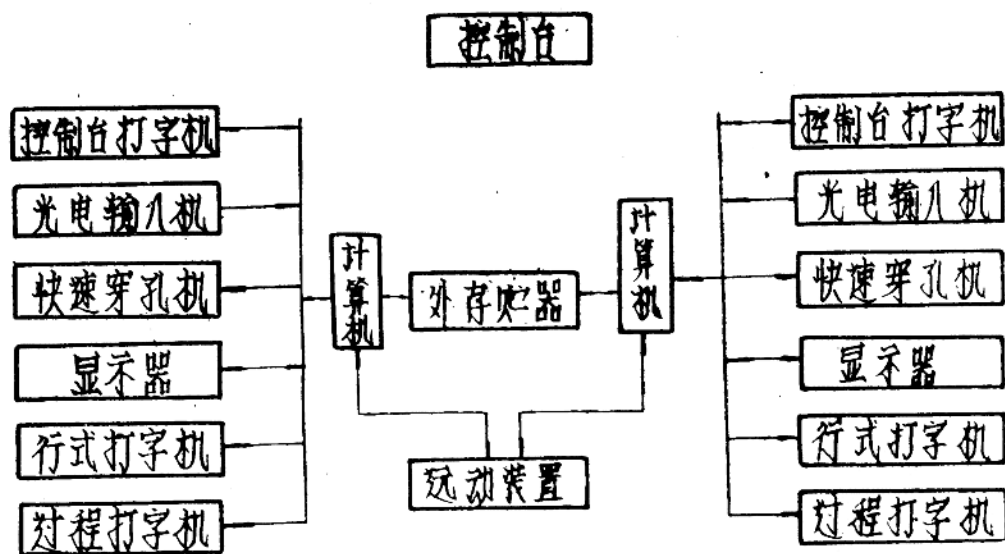


图1 电力系统控制中心的结构示意图

一般为了加快主机的响应时间，减轻主机的负担，增设前置处理机来完成数据收集和处理器人机联系简单而频繁的功能，因为这些计算任务并不需要高速、大容量的计算机去完成。如果把这些实时任务都集中在主机上，就会加重主机负担，而降低了它处理较复杂任务在能力。带有多台前置处理机的双机布置如图2所示。自控系统中计算机的基本结构如图3所示。



图2 带有多台前置处理机的双机布置图

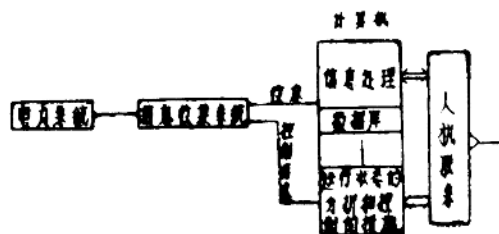


图3 计算机控制系统的基本项构

### 一、信息收集系统及其处理

在电力系统自动监视和控制系统中，信息收集系统的作用是确定系统的运行条件，提供每个控制功能所必须的信息输入。同时，信息系统还将提供运行人员和系统间的联系，根据需要对运行人员提供信息。如电力系统的频率、电压、功率和开关状态，还有温度等信息可通过传感器、远动装置和传输通道送到调度中心。信息送来进入计算机后，需进行处理（加工及修正），处理后将得到精确和完整的运行参数存储在反映电力系统实际状态的数据库中，如读写存储器RAM，和只读存储器ROM等。

在信息处理过程中，还可根据预先设定的上下限校核实时的信息。当超出上下限时，将报警引起运行人员注意以便及时采取相应的措施。例如，电力系统频率就与额定值间差值不能超过 $\pm 0.4\%$  对50赫来说，即不能超过 $\pm 0.2$ 赫。

### 二、数据库和人机联系装置

数据库用来存放电力系统的运行状态数据，并向所有电力系统监视和控制计算机提供正确的数据。为了预报电力系统近期和远期的未来运行状态，可根据数据库中保留的历史记录数据和实时信息进行未来负荷的预测计算，为未来的经济运行，安全分析及编制计划提供数据。数据库中的信息，可通过人机联系装置，根据运行人员的要求提供所需要的数据信息。人机联系装置最常用的是屏幕显示器。它可以显示电力系统实时运行状态的系统接线图，断路器，隔离开关的运行状态和预制的实际负荷曲线。运行人员可以利用键盘向控制系统输入信息，增删数据库中的数据，修改指令等等。

### 三、运行状态的分析计算：

1. 电能质量的分析计算。（1）控制发电机出力分配，以达到维持系统频率为额定值和联络线功率为给定的数值。计算结果，将对控制机组发出增减出力的控制信号。（2）对电压、无功功率分析计算，通过调节发电机励磁，变压器分接头和并联电容等措施来改变电压使线损最小并控制机组间无功功率的合理分配。

2. 经济调度计算。一般约几分钟进行一次，确定各发电厂的经济负荷分配，使全系统的发电成本为最小。在有水、火电厂系统中还应考虑水、火电厂的联合调节问题。此外，还要考虑机组开停组合的最低成本问题。

通常计算的机组分三种形式：（1）必须运转的机组，它经常接到系统上，并且其出力不小于规定的最小值。（2）周期运行的机组，需要根据最经济的条件，由程序来决定其启停顺序。（3）峰值运转的机组，其任何时候均能启动，不受优先顺序限制。

3. 运行状态的安全性分析。这种分析考虑三种状态：即正常状态、紧急状态、和恢复状态。这三种状态的概念分成了具有不同控制目标的三个问题。就当前的技术水平而言，对系统控制中心设计具有主要影响的是正常状态的控制。这也反映了它对自控技术的水平。可以说，安全控制的目标是使电力系统保证处于正常状态，防止它转变成紧急状态和恢复状态。

#### 四、电力系统自动控制

电力系统中要求一些基本的物理量如频率、电压等保持一个定值或按照一定的规律变化。用一种控制装置自动地实现上述任务的叫做自动调节器，而被自动调节器控制的设备叫做控制对象。两者加在一起统称为自动控制系统有各种各样具体形式，但是总的说，可归纳为两种，即开环控制系统和闭环控制系统。开环控制系统方框图如图4所示。

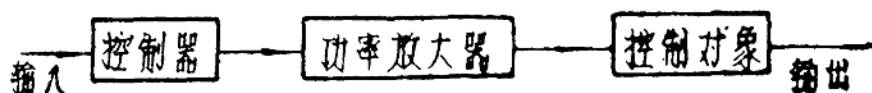


图4 开环自控系统方框图

其特点是：作用信号是单方向传递的，给定一个输入，便有相应的一个输出，但是输出量不可能有准确的数值。（假如控制对象受系统干扰的大小而进行输入量的修正）。有时，为了提高开环控制精度，常不得不用较精密的元件，但造成投资较大。

闭环自控系统方框图 如图5所示。

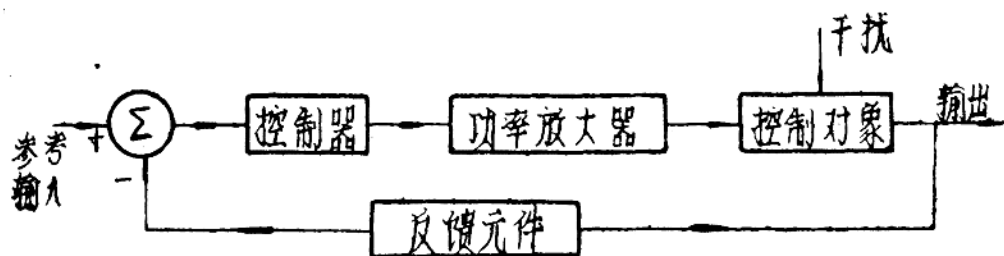


图5 闭环自控系统方框图

如图5所示，输出信号通过元件反过来影响控制信号的，就构成了反馈。图中 $\Sigma$ 为比较环节，在此输入信号与反馈信号进行比较，其差值输出即误差信号成为控制器的实际输入。这样系统的输出对控制作用有直接影响（即有负反馈），较开环自控系统有明显的优点。我们电力系统自动化都采用这种自控系统。但是，实际系统一般都有质量，惯性或时滞。它是一个动态系统。因此，对于一定的输入，系统的输出或相应的响应往往是振荡加剧，这就增加了问题的复杂性，而也给我们提供了解决这个问题的课题。

我们在评定一个自控系统的品质时，除了要看它在稳定状态下，误差是否得到相应的调

整，保证一定的准确度外，（例如：在电力系统中我们希望发电机的端电压不致因外面负荷增减而小于或大于额定值，这个实际端电压与额定值为误差，而它靠自动调节励磁装置进行调整。如能保证达到要求的精确度，我们认为满足了自控系统静特性的要求。）还要看它在调节过程中的品质，这就是自动调节装置的动特性。仍举上述例子，当励磁绕组的电感使得调节装置执行机构动作不能即时地随着误差变化而有延缓现象发生，于是当被调整量 $\Delta U$ 已达到给定值即零点时，但执行机构由于延缓作用在短时间内还继续向原来方向进行，使 $\Delta U$ 超过零点而成负值，从而产生了与符号相反的误差，于是执行机构反方向动作，但又由于延缓，使被调整量由 $-\Delta U$ 再变成 $+\Delta U$ ，这样被调整量往往在给定值两旁摆动，形成一个振荡过程，这振荡若是减幅振荡，则系统最后达到平衡状态，而被认为稳定，否则，系统就是不稳定的，应指出，不稳定的系统根本无法自动调整。

除上述要求外，尚需自动调整速度快，灵敏度大，振荡次数少，以及在振荡时被调整量与稳定值之间最大的相差量要小。

# 第一章 同步发电机的自动并列

## 第一节 概述

在电力系统中，并列运行着的各发电机的转子以相同的电角速度  $\omega$  旋转着，各发电机转子间的相对电角度  $\delta$  不超过允许值，发电机的这种运行状态称为并列（同步或同期）运行。参加并列运行的各发电机是同步的。把发电机投入电力系统并列运行，需要进行一系列的操作，这一操作过程称为发电机的并列操作（常称并车）。

由于电力系统运行方式的改变，系统中的某些主要设备，如发电机、变压器等需要相应地切除或投入。当发电机和某些变压器投入时，需要进行并列操作。实践表明，在发电机投入并列运行的瞬间，往往伴随着电流冲击和功率冲击。这些冲击将引起系统电压瞬时下降。如果操作错误，冲击电流过大，可能对机组造成机械损坏或引起发电机绕组的电气损坏。为此，发电机必需在一定的条件下进行并列操作，以保证电力系统的安全运行。

同步发电机两种并列操作方法：准同期法和自同期法。采用准同期并列时发电机在并列前已经励磁，并接近同步速度旋转。在合适的时刻投入发电机断路器，使断路器触头接通的瞬间，冲击电流不超过允许值，接着发电机被拉入同步。自同期并列时，将未励磁的发电机升速至接近同步转速  $n_s$  时，把定子回路投入系统，然后再加上励磁，在同步转矩作用下，发电机被拖入同步。

### 一、准同期并列条件的分析

为避免并列时出现冲击电流与振荡现象，准同期并列时，应满足下述三个条件：

- (1) 待并发电机电压  $U_i$  与系统电压  $U_s$  的幅值相等  $U_{i_m} = U_{s_m}$ ；
- (2) 待并电机频率  $f_i$  与系统频率  $f_s$  相等，即  $f_i = f_s$  或  $\omega_i = \omega_s$ ；
- (3) 待并发电机电压与系统电压的相位相同，即  $\delta = 0$ 。

如能同时满足上述三个条件，在发电机投入瞬间，冲击电流为零，电磁力矩也为零，这是准同期方式的最大优点。但是要同时满足这些理想条件是困难的，而且将会拖长并列操作的时间。因此，并列操作的实际条件，允许在一定范围内偏离上述理想条件。现在分别讨论如下。

#### 1. 电压差的影响

如果发电机和电力系统的频率和相位相同而仅仅是电压在数值上不等时，在发电机投入系统瞬间将产生冲击电流，由于发电机的阻抗为电感性，所以这个电流的周期分量是属于无功电流。此电流不产生有功功率的冲击，如图 1—1 所示。

从图中可看出，此时冲击电流为

$$i_{c1} = \frac{\dot{U}_s - \dot{U}_i}{x''_d} = \frac{\Delta \dot{U}}{x''_d}$$

式中  $\dot{U}_x$ ——系统的电压  
 $\dot{U}_r$ ——发电机电压  
 $x''_d$ ——发电机d轴次暂态电抗

当  $U_r < U_x$  时,  $\dot{I}_{cj}$  滞后于  $\Delta \dot{U} 90^\circ$ , 如图 1—1 (a)。该电流对待并联发电机呈容性, 即起助磁作用, 对系统中已运行的发电机呈感性, 即起去磁作用。

当  $U_r > U_x$  时, 由于  $\dot{I}_{cj}$  总是滞后于  $\Delta \dot{U} 90^\circ$ , 则  $\dot{I}_{cj}$  超前于  $\dot{U}_x 90^\circ$ , 如图 1—1 (b)。此电流对发电机起去磁作用, 使发电机电压下降到等于系统电压, 发电机并列后立即送出无功功率。

从上述分析可见, 只存在  $\Delta U$  时, 产生的是无功冲击电流, 冲击电流的最大值 (计及非周期分量的影响) 为

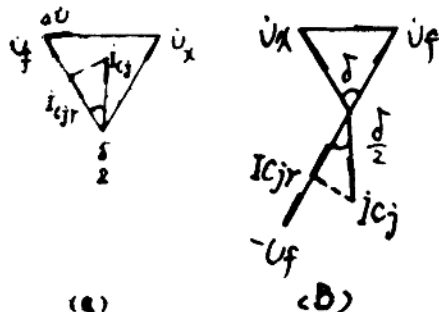
$$I_{cj, max} = \frac{1.9\sqrt{2}\Delta U}{x''_d}$$

式中  $\Delta U = U_r - U_x$ ,  $\Delta U$ ,  $U_r$ ,  $U_x$  为相应电压的有效值。

一般同步发电机能承受空载额定电压时端部短路电流的冲击, 但  $I_{cj}$  过大, 将引起发电机定子绕组发热及绕组端部受到损坏。同时准同期操作是经常进行的, 为了保证发电机的安全, 操作时一般不允许冲击电流超过端部短路电流的  $\frac{1}{20} \sim \frac{1}{10}$ 。据此, 由式 (1—1) 可得准同期并列时, 电压差  $\Delta U$  不能超过  $5 \sim 10\%$ 。

## 2. 相位差的影响

如果电压、频率相同, 而在合闸瞬间发电机电压  $\dot{U}_r$  与系统电压  $\dot{U}_x$  的相位差不等于零而为  $\delta$ , 此时会引起带有功性质的冲击电流, 见图 1—2。



(a)

(b)

图 1—2 相位差的影响

(a)  $\dot{U}_r$  超前  $\dot{U}_x$ , (b)  $\dot{U}_r$  滞后  $\dot{U}_x$

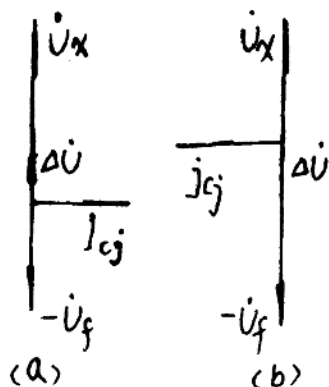


图 1—1 电压差的影响

(a)  $U_r > U_x$ ; (b)  $U_r < U_x$

当发电机电压  $\dot{U}_r$  超前系统电压  $\dot{U}_x$  时, 冲击电流  $\dot{I}_{cjr}$  有功分量  $\dot{I}_{cjr}$  和发电机电压  $\dot{U}_r$  同相, 如图 (a), 发电机发出有功功率。当发电机电压  $\dot{U}_r$  滞后系统电压  $\dot{U}_x$  时, 冲击电流的有功分量  $\dot{I}_{cjr}$  和发电机电压  $\dot{U}_r$  反相, 如图 1—2 (b), 发电机吸收有功功率。冲击电流  $\dot{I}_{cj}$  周期分量有效值为:

$$I_{cj} = \sqrt{\frac{(U_r - U_x \cos \delta)^2}{(x''_d + x_s)^2} + \frac{(U_x \sin \delta)^2}{(x''_d + x_s)^2}}$$

式中  $x''_d$ ——发电机d轴次暂态电抗，对汽轮发电机  $x''_d \approx x''_d$

$x_s$ ——系统的电抗

若电力系统容量为无穷大时， $x_s \approx 0$ 。设  $U_1 = U_2 = U$ ，便有

$$I_{c1} = \frac{2U}{x''_d} \sin \frac{\delta}{2} \quad (1-2)$$

冲击电流的有功分量为

$$\begin{aligned} I_{c1} &= \frac{2U}{x''_d} \sin \frac{\delta}{2} \cdot \cos \frac{\delta}{2} \\ &= \frac{U}{x''_d} \sin \delta \end{aligned}$$

可见，当  $\delta = 90^\circ$  时， $I_{c1}$  最大，轴上将产生冲击力矩。当  $\delta = 180^\circ$  时， $I_{c1}$  最大，接近甚至等于发电机端部三相突然短路电流的两倍，若计及非周期分量的影响，冲击电流的最大值为：

$$I_{c1,max} = \frac{1.9 \times 2 \times \sqrt{2} U}{x''_d}$$

为了保证发电机的安全运行，可将并列操作时产生的冲击电流限制为发电机端部短电流的  $\frac{1}{10}$ ，即  $I_{c1} = \frac{I''}{10}$  ( $I'' = \frac{E_d}{x''_d}$  为三相短路电流周期分量有效值， $E_d$  为发电机电势，

设  $E_d = U$ ) 由式 (1-2) 得

$$\frac{2U}{x''_d} \sin \frac{\delta}{2} = \frac{1}{10} \cdot \frac{U}{x''_d}$$

当  $\delta$  很小时， $2 \sin \frac{\delta}{2} \approx \sin \delta$

便有

$$\sin \delta = \frac{1}{10}$$

最大允许相位差为

$$\begin{aligned} \delta_{r,max} &\approx \sin \delta = 0.1 \text{ 弧度} \\ &= 5.73^\circ \end{aligned}$$

### 3. 频率差的影响

发电机和系统频率不完全相等时，会产生脉动电压和脉动电流。因为频率不等，发电机电压  $\dot{U}_1$  和系统电压  $\dot{U}_2$  之间存在相对运动，时而重合，时而离开，两个电压之差  $\Delta U$  就时大时小，形成脉动电压，从而产生脉动电流。

当发电机的频率高于额定频率，并列后，发电机电压超前于系统电压，所产生的电流  $I_{c1}$  的有功分量  $I_{c1}$ ，与  $\dot{U}_1$  同相，相当于发电机送出有功功率。同理，当发电机的频率小于系统频率时，并列后，发电机电压  $\dot{U}_1$  滞后于系统电压  $\dot{U}_2$ ，同样产生一个电流，且其有功分量  $I_{c1}$ ，与  $\dot{U}_1$  反向，此时发电机吸收有功功率。可见，由于频率不等，所产生的脉动电流，

将引起刚投入系统的发电机带上过多的正有功分量或负有功分量，使发电机轴上产生振动，严重时可能失步。

设发电机和系统的频率差（称为滑差频率） $f_s$ 为

$$f_s = f_1 - f_2$$

两电压间的相对旋转电角速度，称为滑差角速度  $\omega_s$ （简称滑差）于是便有

$$\begin{aligned}\omega_s &= \frac{d\delta}{dt} \\ &= \frac{d(\varphi_1 - \varphi_2)}{dt} \\ &= \frac{2\pi d(f_1 t - f_2 t)}{dt} \\ &= 2\pi(f_1 - f_2) \\ &= 2\pi f_s\end{aligned}$$

式中  $\varphi_1, \varphi_2$ ——发电机和系统交流电压的瞬时相角。

滑差周期为

$$T_s = \frac{2\pi}{\omega_s} = \frac{1}{f_s}$$

根据（2）中所述，并列时，最大允许相位差为  $\delta_{y, \max}$  可表示为

$$\begin{aligned}\delta_{y, \max} &= \omega_s \Delta t_{\max} \\ &= \omega_s (\Delta t_{DL, \max} + \Delta t_{z, \max})\end{aligned}$$

式中  $\Delta t_{\max}$ ——合闸时间总误差的最大值

$\Delta t_{DL, \max}$ ——断路器机构造成的时间误差最大值

$\Delta t_{z, \max}$ ——自动准同期装置合闸时间误差的最大值

在合闸时间的误差中，断路器机械机构元件如弹簧、脱扣机构等时间误差所占的比例较大，如  $\Delta t_{z, \max} \ll \Delta t_{DL, \max}$ ，则

$$\Delta t_{\max} \approx \Delta t_{DL, \max}$$

$\Delta t_{\max}$  一般值为 0.07~0.12 秒。由此得出待并发电机并入系统时最大允许滑差的一般数据为

$$\begin{aligned}T_{s, \min} &= \frac{2\pi}{\omega_{sy, \max}} \\ &= \frac{2\pi \cdot \Delta t_{\max}}{\delta_{y, \max}} \\ &= \frac{2\pi \times 0.1}{0.1 \text{ 弧度}}\end{aligned}$$

$$\approx 6.28 \text{ (秒)}$$

一般取  $T_{s, \min} \approx 6 \sim 7 \text{ 秒 (最小滑差周期)}$ 。

从以上分析可看出，由于冲击电流的限制，并列时的滑差与相位差都必须较小，这就使得，在正常准同期过程中，同步发电机的振荡过程便成了比较次要的因素，因而不必考虑其影响了。

我国的运行经验是，在发电机并入系统时，滑差周期控制在 10 秒左右较合适，最大允许频差为

$$f_s \leq 0.2 \sim 0.5 \%$$

## 二、并列操作的基本要求

发电机采用准同期方式并列时，根据前面分析可知，只要电压、频率、相位三个条件中，任一条件不满足，在并列瞬间都将产生对发电机有较大危害的冲击电流和电磁力矩。

采用自同期方式并列时，从并列的过程可看出自同期并列有如下特点：

1. 能将待并的发电机迅速拖入同步。在实际并列时，已先将发电机的转速接近同步转速，并列时（几乎与并列同时），给发电机转子绕组加入励磁，此时产生较大的同步转矩，故能迅速将发电机拖入同步。正常情况下并列时间为 1~2 秒（准同期为 2~3 分钟），事故情况下约为 10 秒。

2. 并列时产生较大的冲击电流。采取自同期方式并列时，并列瞬间与电动机的情况相似，相当于电力系统通过待并发电机的定子绕组发生三相短路，产生较大的冲击电流，其冲击电流周期分量有效值为

$$I_{s1} = \frac{U_s}{x''_d + x_s}$$

从上式中看出，采用自同期方式并列时，所产生的冲击电流  $I_{s1}$ ，不会超过发电机端部三相短路电流。但并列时产生的电流振荡，将在定子绕组内产生很大的电动力，对定子绕组的端部接线、静止夹件的焊接处（为最薄弱的环节）有较大的损伤，严重的是积累性的损伤。此外，并列时还会产生转矩冲击，对转子的钢结构和转子绕组产生很大的机械应力。因此并列时冲击电流所产生的电动力必须限制，使不超过发电机端部三相短路时短路电流所产生的电动力。即

$$F_{s1} \leq \frac{1}{2} F_d \quad (\text{考虑安全系数为 } 2)$$

式中  $F_{s1}$ ——自同期并列时冲击电流所产生的电动力。

$F_d$ ——发电机端部三相短时短路电流所产生的电动力。

由于电动力与电流平方成正比，便有

$$I_{s1} \leq \frac{1}{\sqrt{2}} I''$$

又

$$I'' = \frac{E_s}{x''_d} = \frac{1.05}{x''_d}$$

式中  $E_d$ ——三相突然短路时发电机的空载电势  $E_d = 1.05$ 。故采用自同期方式并列时，必将冲击电流限制为

$$I_{ei} \leq \frac{0.74}{x''_d}$$

综上所述，无论采用哪种并列方式，如果并列操作不正确，发电机将因承受冲击而可能损坏，系统的电压，频率等参数亦发生剧烈变化，以至达到严重威胁系统安全运行的地步。因此，发电机并列操作时，应满足以下两个基本要求。

1. 并列瞬间，冲击电流不超过允许值。

根据《继电保护和自动装置设计规程》中规定，当非同期合闸时，最大冲击电流周期分量与额定电流  $I_e$  之比不应超过下列数值。

对于无阻尼回路的水轮发电机为

$$\frac{I_{ei}}{I_e} \leq \frac{0.6}{x'_d} \quad (x'_d \text{——水轮机暂态电抗})$$

对于有阻尼回路的水轮发电机为

$$\frac{I_{ei}}{I_e} \leq \frac{0.6}{x''_d}$$

对于汽轮发电机为

$$\frac{I_{ei}}{I_e} \leq \frac{0.65}{x''_d}$$

对于调相机为

$$\frac{I_{ei}}{I_e} \leq \frac{0.84}{x''_d}$$

当采用自同期合闸时，最大冲击电流周期分量与额定电流之比，不应超过

$$\frac{I_{ei}}{I_e} \leq \frac{0.74}{x''_d}$$

2. 并列后发电机应迅速投入同步运行。

发电机的并列操作可以是手动的，也可以是自动的。手动并列时，发电机投入电力系统的所有并列操作，包括发电机转速、电压的调节、断路器合闸等均由运行人员手动进行。自动并列时，上述全部操作均由自动装置自动完成。有时也采用半自动并列操作，此时，一部分操作（如调速、调压）由运行人员自动完成，而另一部分操作（如断路器合闸），则由自动装置自动完成。一般，在正常情况下并列，多采用准同期方式，在故障情况下，为加速故障处理，对水轮发电机并列时，冲击电流不超过允许值时，也可采用自同期方式。

### 三、同期点的选择

为了达到并列运行的目的，在发电厂和变电站的一部分断路器上，必须由同期装置进行并列操作，这些有同期并列任务的断路器称为同期点。同期点的并列操作方式、同期装置的配置以及同期点的选择，应按发电厂或变电站的运行要求在设计时选定，现分别介绍如下。

#### 1. 发电机的同期

所有发电机出口断路器均作为同期点的同期方式和同期装置的配置，按《继电保护自动装置设计技术规程》确定。

### 2. 变压器的同期

三绕组变压器或自耦变压器与电源相连接的各侧断路器，均应作为同期点。这样，当任一侧断路器事故跳闸或断开检修后，可在此断路器上进行并列操作。恢复并列运行。双绕组变压器或联络变压器一般有一侧断路器作为同期点即可。但某些主接线，例如有一侧为多角形主接线的联络变压器，其两侧断路器也可均作为同期点。单元接线的变压器高压侧断路器（发电机和变压器之间不装设断路器），以及与发电机直接连接的变压器低压侧断路器，其同期点的并列方式与发电机断路器相同，其余变压器各侧断路器可以只用手动准同期方式。

### 3. 线路和母线的同期

对电压为110KV及以上的线路，接在单母线上，双母线上或接在带旁路母线上的线路断路器一般均作为同期点。与多角型接线和外桥接线的线路相关的两个断路器均作为同期点，一个半接线的运行方式变化较多，一般所有断路器均作为同期点。

对于6~10KV线路，只有在作为两个相邻电厂联路线时，才考虑设置同期点。其他馈电线路均不需作为同期点，线路断路器一般均采用手动准同期方式。有些线路亦采用半自动、自动准同期方式。

母线的联络断路器均作同期点，它对于同一母线上的所有发电单元都是后备同期点。对110KV及以上线路，当设有旁路母线时，在线路主断路器因故退出工作的情况下，可利用旁路母线断路器进行并列操作。而母线的分段开关一般不作为同期点。

变电站一般不考虑同期并列操作，因为频率和电压的调节只能在发电厂中进行。但系统间的联络线路应装设半自动准同期装置和手动准同期装置。

发电厂和变电站的同期点和同期方式的一般配置，可参照图1—3。

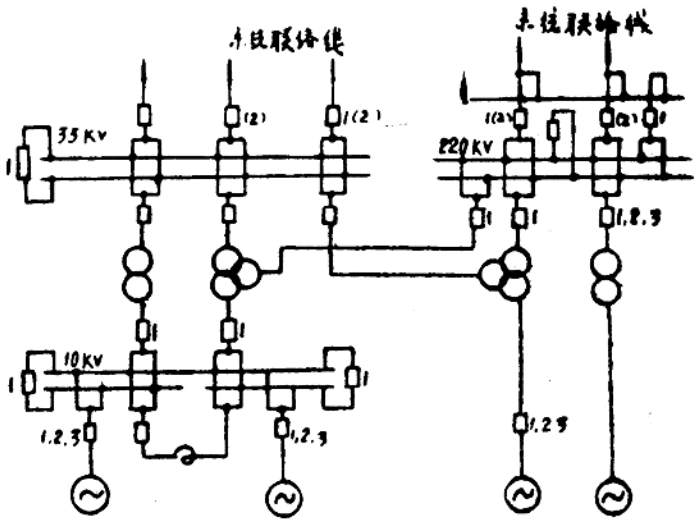


图1—3 发电厂同期点和同期方式配置式

图中1—手动准周期方式；2—自动准同期方式；3—自动同期方式，括号内的可以装

也可以不装。

#### 四、自动准同期装置的功能

对于自动准同期装置，只要满足前述的三个条件，便自动地将发电机投入系统。因此，自动准同期装置具备两种功能，一是自动检查待并发电机与系统之间的电压差（不超过5~10%）及频差（不超过0.2~0.5%）是否满足并列条件，并在满足条件时，能自动地提前发出合闸脉冲，使断路器主触头在相位差 $\delta=0$ 的瞬间闭合。二是当电压差、频差不满足要求时，能对待并发电机自动进行均压、均频，以加快并列的过程。

### 第二节 准同期并列的原理

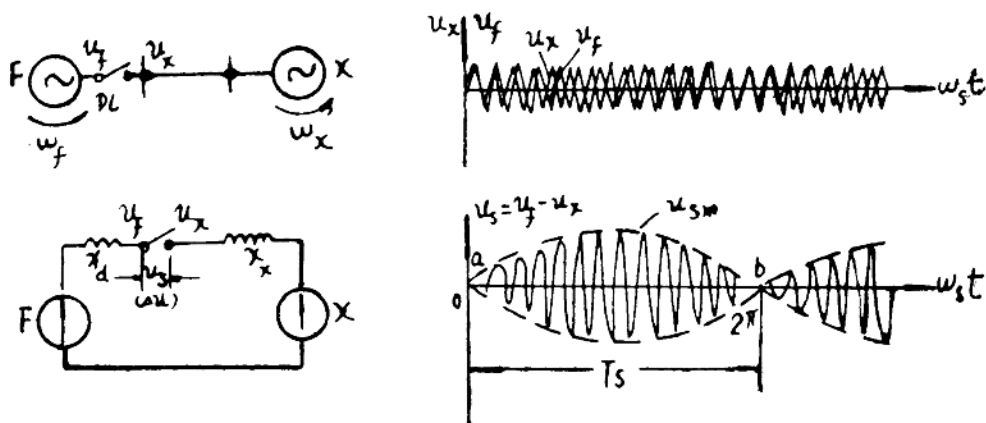
准同期并列的主要优点是，并列时冲击电流很小，对系统不会产生较大的影响。因此在正常情况下它将作为同步发电机主要的并列方式，为了进一步了解各种并列条件的变化对并列过程带来的影响，下面将着重分析脉动电压（又称滑差电压）及其特性。

#### 一、脉动电压

到目前为止，几乎所有的准同步装置都要利用脉动电压这一特性进行工作。所谓脉动电压指待并发电机的电压 $u_f$ 和系统电压 $u_x$ 之间的电压差，即待并发电机断路器两侧触头间的电压差，通常用 $u_s$ 表示。

图1—4表示发电机和系统的并列。图(a)为发电机和系统的等值电路，图(b)表明两电压的幅值相等，且初相角为零的情况下， $u_f$ 和 $u_x$ 随 $\omega_s t$ 的变化关系以及在断路器DL两触头间脉动电压 $u_s$ 随 $\omega_s t$ 的变化曲线。脉动电压为

$$u_s = \Delta u = u_f - u_x \quad (1-3)$$



(a) 发电机等值电路图

(b) 脉动电压变化曲线

图1—4 发电机并列图

从图(b)可看出，在一个周期 $ab$ （用 $T_s$ 表示）内，脉动电压 $u_s$ 的变化规律为，在 $a$

点, 发电机电压  $u_f$  与系统电压  $u_x$  的幅值相等, 相位亦相同, 故在该点的电压差  $u_s = u_f - u_x$  为零, 随着  $\omega t$  的变化, 出现电压差值, 当  $u_f$  与  $u_x$  相位相反 (即为  $\pi$ ) 时,  $u_s$  为最大, 此后,  $u_s$  随  $\omega t$  的变化而减小, 达 b 点 (为  $2\pi$ ) 时, 两电压的差值减小为零。脉动电压的概念还可利用矢量来描述。图 1—5 是脉动电压矢量图。

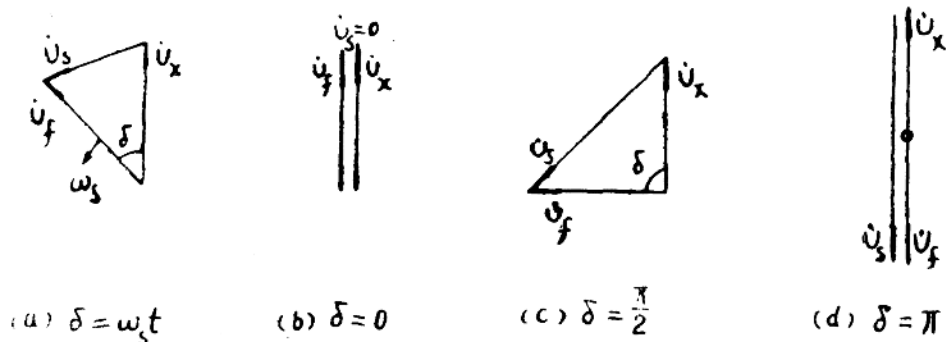


图 1—5 脉动电压矢量图

发电机和系统电压的瞬时值为

$$u_f = U_{fm} \sin(\omega_f t + \delta_1)$$

$$u_x = U_{xm} \sin(\omega_x t + \delta_2) \quad (1-4)$$

式中  $U_{fm} \cdot U_{xm}$  —— 发电机和系统电压的幅值

$\delta_1 \cdot \delta_2$  —— 发电机和系统电压的初相角

$\omega_f \cdot \omega_x$  ——  $\dot{U}_f \cdot \dot{U}_x$  的角速度

为讨论问题的方便, 假设:  $U_{fm} = U_{xm} = U_m$ ;  $\delta_1 = \delta_2 = 0$ 。从 (1—3) 和 (1—4) 式可得脉动电压  $u_s$  为

$$\begin{aligned} u_s &= u_f - u_x = U_m \sin \omega_f t - U_m \sin \omega_x t \\ &= 2 U_m \sin \frac{(\omega_f - \omega_x)t}{2} \cos \frac{(\omega_f + \omega_x)t}{2} \end{aligned} \quad (1-5)$$

从上式可见, 脉动电压  $u_s$  是  $\frac{1}{2}(\omega_f + \omega_x)t$  的余弦函数而其幅值是  $\frac{1}{2}(\omega_f - \omega_x)t$  的正弦函数。我们感兴趣的是图 1—4 (b) 中虚线所示的脉动电压的包络线。用  $u_{sm}$  表示  $u_s$  包迹的瞬时值, 便有