

高等学校教材

电力系统自动装置原理

上海交通大学 杨冠城 主编

水利电力出版社

内 容 提 要

全书共分五章，第一章主要阐述了恒定越前时间自动并列装置的工作原理；第二章介绍了构成同步发电机励磁自动控制系统各单元的工作原理及其运行特性；第三章分析了励磁控制系统的稳定性及其对电力系统运行稳定性的作用；第四章剖析了一次调节二次调节的动态行为以及调频的有关准则；第五章重点介绍自动低频减载装置的工作原理。

本书为高等学校“电力系统及其自动化（发电厂及电力系统）”专业教材，也可供有关工程技术人员参考。

高等学校教材

电力系统自动装置原理

上海交通大学 杨冠城 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 11.25印张 261千字

1986年11月第一版 1986年11月北京第一次印刷

印数00001—15920册 定价1.90元

书号 15143·6177

前 言

《电力系统自动装置原理》是根据高等院校水利电力类教材编审委员会于1982年制订的教学大纲而编写的。在电力系统继电保护自动化编审小组主持下，于1983年在武汉讨论了本书的编写大纲，于1984年在青岛又进一步讨论了编写内容。

本书由上海交通大学电力系杨冠城、周贵兴、吕琴康同志编写。

全书共分五章，其中第二、三章由周贵兴同志执笔、吕琴康同志参加了第四章编写，并承担了全书图表的绘制等工作。其余部分由杨冠城同志执笔，杨冠城同志任主编。

本书由华中工学院樊俊教授主审，他对本书内容提了不少宝贵意见，在此表示衷心感谢。

本书为高等院校“电力系统及其自动化（发电厂及电力系统）”专业教材，也可供有关的工程技术人员参考。

由于水平所限，书中难免存在着缺点和错误，希望读者批评指正。

编 者

1986年2月

目 录

前言	
绪论	1
第一章 同步发电机的自动并列	4
第一节 概述	4
第二节 准同期并列的基本原理	10
第三节 恒定越前时间准同期并列装置	15
第四节 频率差控制	31
第二章 同步发电机励磁自动控制系统	39
第一节 概述	39
第二节 同步发电机励磁系统	49
第三节 励磁系统的可控整流电路	54
第四节 励磁调节装置原理	62
第五节 并联运行机组间无功功率的分配	89
第三章 励磁自动控制系统的动态特性	94
第一节 概述	94
第二节 励磁控制系统的传递函数	95
第三节 励磁自动控制系统的稳定性	101
第四节 励磁自动控制系统对电力系统稳定的影响	108
第四章 电力系统频率及有功功率的自动调节	122
第一节 电力系统的频率特性	122
第二节 调节系统的传递函数	130
第三节 电网的频率调节特性	138
第四节 电力系统调频方式与准则	149
第五节 电力系统的经济调度与自动调频	156
第五章 电力系统自动低频减载及其它安全自动控制装置	162
第一节 概述	162
第二节 自动低频减载	163
第三节 其它安全自动控制装置	171

绪 论

一、引言

随着电力工业的迅速发展，电力系统的规模在不断扩大，系统的运行方式也越来越复杂。供电的可靠性和经济性与国民经济效益、人民生活水平密切相关。为了更好地达到安全、经济和电能质量等各项指标，电力系统运行对自动化提出了越来越高的要求，从而促进了电力系统自动化技术的不断发展。

电能变换、传输和分配过程中遵循着功率平衡的原则。所以由发电厂、变电所、输电线和用户所组成的电力系统，在运行中是一个有机的整体。电力系统分布在广阔的地域内，如图 0-1 所示。调度控制中心对电力系统进行监视和控制，其主要任务是合理地调度系统中各发电厂的出力，及时地处理运行中所发生的问题。

按一次能源来区分，发电厂可分为火电厂、水电厂和核电厂等。各类电厂在将一次能源转换成电能之前，其生产流程均不相同。

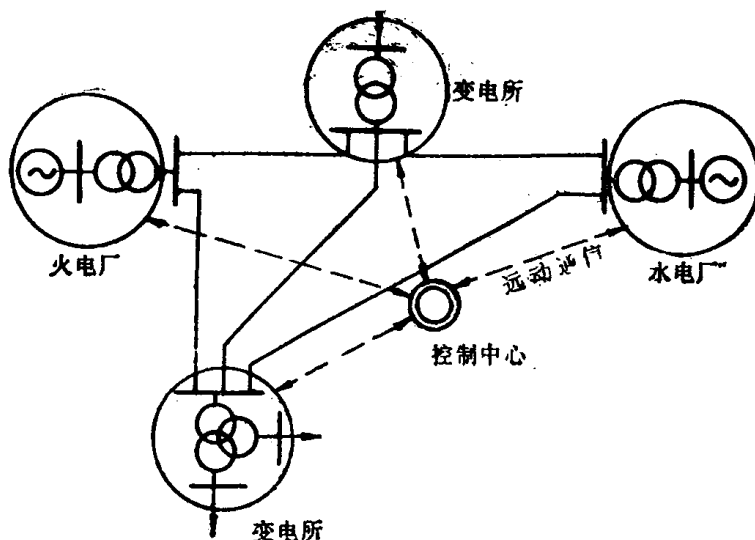


图0-1 电力系统的组成

二、电力系统自动化分类

任何一个自动控制系统都可以表示为图 0-2 所示的框图。控制对象的运行状态信息送给自动控制装置，自动装置对采集来的信息进行综合、分析，根据控制要求送出控制信息，以完成控制功能。

根据电力系统的组成和运行特点，电力系统自动化大致可划分为三个不同内容的控制系统。

1. 电力系统自动监视和控制

这是为电网调度服务的，其主要任务是提高电力系统的安全、经济运行水平。电力系统中各发电厂、变电所将反映电力系统运行状态的实时信息，由远动装置送至调度控制中心的计算机系统。计算机可对当前运行状态进行分析，通过人机联系系统显示出来，

供运行人员参考,为运行人员集中精力指挥运行创造条件。利用这项技术可极大地提高电网的安全、经济运行水平。

2. 电厂动力机械自动控制

电厂的动力机械随电厂类型不同而有很大的差别。水电厂、火电厂、核电厂等的动力设备截然不同,其控制规律和自动化要求相差很大。例如火电厂中锅炉、汽轮机热力设备的自动控制与水电厂中水轮机械的自动控制就极不相同。

电厂动力机械自动控制是发电厂自动化的主要组成部分,也是电力系统自动化的基础。所以新建的 20 万 kW 以上的汽轮发电机组一般需配置计算机进行监控。

3. 电力系统自动装置

这是指发电自动控制及发电厂、变电所主接线运行操作的自动控制装置。它们是直接为电力系统安全、经济和保证电能质量服务的。

同步发电机是转换、产生电能的机械。如图 0-3 所示,它有两个可控输入量——动力元素和励磁电流。其输出量为有功功率和无功功率,这两个可控输入量还分别与系统频率和发电机端电压有关。如图 0-3 中所示的 $P \cdot f$ 控制和 $Q \cdot U$ 控制。

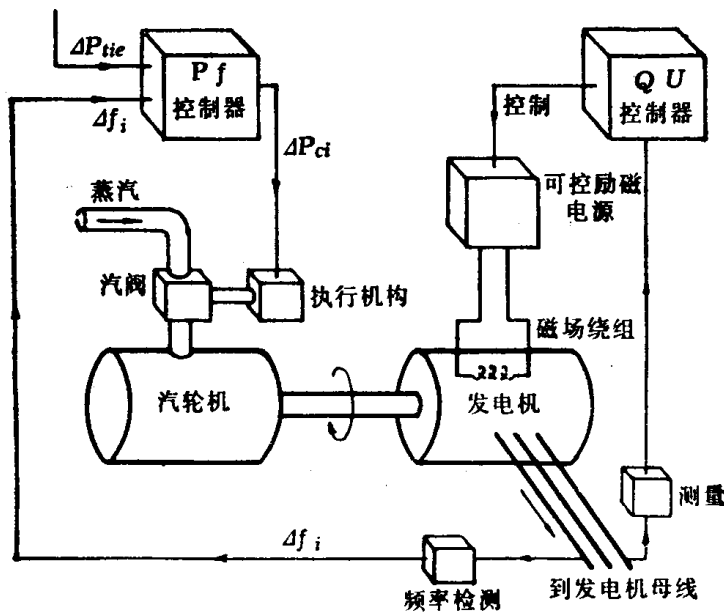
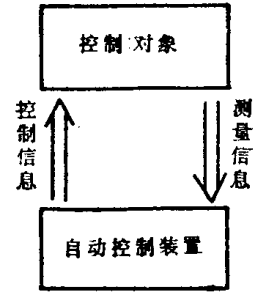


图0-3 发电自动控制示意图

主接线运行操作分为正常运行操作和反事故操作两大类,反事故对策自动化装置又可称为电力系统安全自动控制装置。

三、本课程的主要内容

电压和频率是电能质量的两个主要指标,本书对同步发电机励磁自动控制和频率——有功功率自动控制将进行深入讨论。这两部分是发电自动控制的内容,都属于自动调节的类型。

正常运行方式下的自动操作是电力系统自动装置中又一重要内容，自动并列装置就是这一自动装置的例子。为了保证系统供电的可靠性，在事故情况下需采取各种可能的自动化措施来确保系统安全运行，这类装置原则上也属于本课程研究的内容。但是电力系统继电保护已自成体系另设课程，因此，这类自动装置列入本课程的主要有低频减载、自动解列、自动切机、电气制动等等。它们都是反事故对策中的重要自动化装置。

由此可见，电力系统自动装置有两种类型，即自动调节装置和自动操作装置。自动调节的基本理论在《自动控制理论》课中讲授，涉及电力系统运行的基础知识在《电力系统》课程中讲授，本课程侧重于对电力系统运行特点、在实施自动化时所遵循的基本规律和对自动装置所提出的要求进行阐述。

电力系统自动装置随着元器件的发展而不断更新。目前自动装置中应用到的晶体管线性电路、数字电路以及大规模集成电路方面的知识，这已在《电子技术》课程中讲授，本书不再重复。

电力系统自动化装置在解放前几乎是空白，解放后随着电力工业的发展取得了很大成就，为电力系统运行水平的提高作出了贡献。

近年来，由于现代控制理论、信息论等方面的成就和大规模、超大规模集成电路的突破性进展，以及计算机技术和数字通讯技术等一系列先进技术的发展，自动控制技术正面临着日新月异的大好形势，电力系统自动化工作在这些成就的影响下，也充满着活力，处于大发展前夕。

鉴于自动化装置不断更新，本书着重于原理方面的叙述，虽然也介绍了装置的某些电路，但是着眼点还是为了讲清楚有关的原理。

根据教学大纲的要求，本书分五章讲授。

第一章讲同步发电机自动并列。这是电力系统运行中重要的操作，也是自动操作装置的一个典型，因此对它的工作原理作了较为详细的叙述。

第二、三章讲同步发电机励磁自动控制系统。这是电力系统自动调节的一个典型，本书作了较为深入的讨论。第二章主要叙述励磁自动控制系统的组成和它的静态特性。第三章分析其动态行为。

第四章讲电力系统频率和有功功率自动控制。频率是电能质量的重要指标，有功功率分配是电力系统运行方式中重要问题之一。本章从电力系统调频出发展开讨论，侧重于控制系统的分析以及功率分配问题。

最后一章，重点介绍了按频率自动减载装置。这是电力系统事故情况下，较为典型的一种防止事故扩大的自动装置。其它安全自动控制装置则主要结合电力系统运行就其实施原理进行了介绍。

第一章 同步发电机的自动并列

第一节 概 述

一、并列操作的意义

电力系统运行中，任一母线电压可表示为

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1-1)$$

式中 U_m ——电压幅值；

ω ——电源的角频率；

φ ——初相角。

(1-1) 式反映了电网运行中该母线电压的幅值、频率和相角。这三个重要参数常被指定为运行母线的状态量。

一台发电机组在未投入系统运行之前，它的电压 u_f 与并列点电压 u_s 二者的状态量往往不等，须对待并发电机组进行适当的操作使之符合并列条件后，才允许进行并列。这一系列操作称为并列操作。

同步发电机组并列时应遵循如下的原则：

(1) 并列断路器合闸时，对待并发电机组的冲击电流应尽可能小，其最大值不应超过允许值；

(2) 发电机组并入系统后，应能迅速进入同步运行状态，进入同步运行的暂态过程要短。

在电力系统运行中，同步发电机的并列操作是一项基本操作。随着负荷的变化，电力系统中运行的发电机台数是不断变化的，因此，在电力系统中并列操作几乎每天都需进行。另外，当系统发生某些事故时，往往要求将备用发电机组迅速投入电网运行。可见，在电力系统运行中并列操作是较为频繁的。

随着电力系统容量的不断增大，同步发电机的单机容量也越来越大，不恰当的并列操作将导致严重后果。因此，研究和分析同步发电机并列操作的规律，提高其自动化水平，对于系统的可靠运行具有很大的现实意义。

在电力系统中，同步发电机的并列方法可分为准同期并列和自同期并列两种。

系统在正常运行情况下，一般采用准同期并列方法将发电机组投入运行，因此它是本章主要介绍的内容。自同期并列方法已很少采用，只有当系统发生事故时，为了迅速投入水轮发电机组，才采用自同期并列方法。因此本书只介绍它的一般原理，有关它的应用将在第五章中作简单的介绍。

二、准同期并列

设待并发电机组 F 已经加上了励磁电流，其端电压为 \dot{U}_f ，如图 1-1 (a) 所示。DL 为并列断路器，DL 另一侧的系统电压为 \dot{U}_s 。并列断路器合闸之前，DL 两侧电压的状态量一般不相等，须对发电机组 F 进行控制使它符合并列条件，然后发出合闸信号使 DL

合闸。

由于 DL 两侧电压的状态量不等, DL 主触头间具有电压差 $\Delta\dot{U}$, 其值可由图 1-1(b) 的矢量求得。

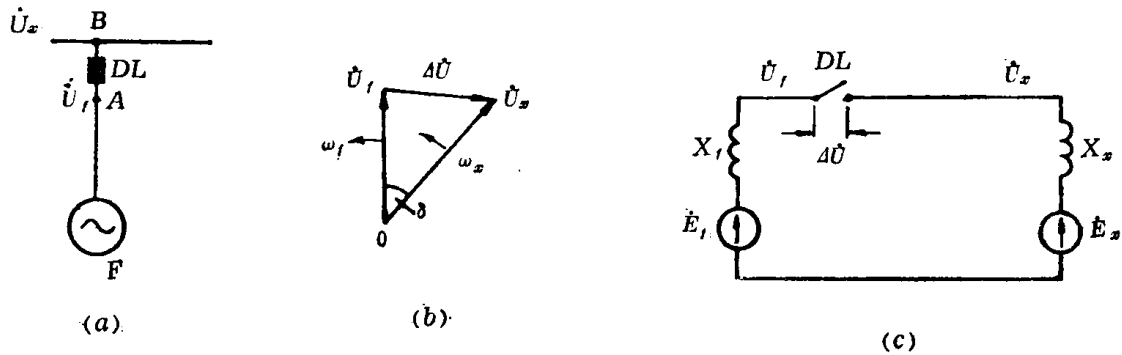


图1-1 准同期并列

(a) 电路示意; (b) 矢量图; (c) 等值电路图

设发电机电压的角频率为 ω_1 , 系统电压 \dot{U}_s 的角频率为 ω_s , 它们间的矢量差即为 $\Delta\dot{U}$ 。并列时计算冲击电流的等值电路如图 1-1(c) 所示。当系统参数一定时, 冲击电流决定于合闸瞬间的 $\Delta\dot{U}$ 值。并列时要求 DL 合闸瞬间的 $\Delta\dot{U}$ 值尽可能小, 其最大值不应超过允许值, 最理想情况 $\Delta\dot{U}$ 的值为零, 这时合闸冲击电流也就等于零。并且希望并列后能顺利地进入同步运行状态。

综上所述, 并列的理想条件为两侧电源电压的三个状态量全部相等, 即图 1-1(b) 中 \dot{U}_1 , \dot{U}_s 两个矢量完全重合并且同步旋转。所以并列的理想条件可表达为:

$$\left. \begin{aligned} (1) \quad \omega_1 &= \omega_s \quad \text{或} \quad f_1 = f_s \quad \text{待并发电机频率与系统频率相等;} \\ (2) \quad U_1 &= U_s \quad \text{发电机电压与母线电压幅值相等;} \\ (3) \quad \delta &= 0 \quad \text{相角差为零, } \dot{U}_1 \text{ 与 } \dot{U}_s \text{ 两电压矢量重合。} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

这时断路器 DL 主触头间的 $\Delta\dot{U}$ 值等于零, 不但冲击电流等于零, 而且并列后发电机 F 与系统立即进入同步运行, 不会发生任何扰动现象, 所以 (1-2) 式为准同期并列的理想条件。

但是, 实际运行中待并发电机要建立 (1-2) 式的理想条件甚为困难, 三个条件很难同时满足, 其实在实际运行中也没有这样苛求的必要。因为合闸时只要冲击电流较小, 不危及电气设备, 合闸后发电机组拉入同步的暂态过程, 对待并发电机和系统运行的影响较小, 不致引起任何不良后果也就可以了。

因此, 在实际并列操作中, 并列的实际条件允许偏离 (1-2) 式, 其偏离的允许范围则需经过分析确定。下面分析一下如果同步发电机组并列时偏离 (1-2) 式的理想条件将会引起什么样的后果。

(一) 存在电压幅值差

设发电机并列时的电压矢量图如图 1-2(a) 所示。即在并列时:

- (1) 发电机频率 f_1 等于系统频率 f_s ;
- (2) 相角差 $\delta = 0$;
- (3) 电压幅值不等, $U_1 \neq U_s$ 。

则冲击电流的有效值为

$$I_h'' = \frac{U_f - U_x}{X_d'' + X_x} \quad (1-3)$$

式中 U_f, U_x ——发电机电压与系统电压有效值；

X_d'' ——发电机直轴次暂态电抗；

X_x ——系统等值电抗。

从图 1-2 (a) 可见，冲击电流主要为无功电流分量。冲击电流最大瞬时值的计算式为

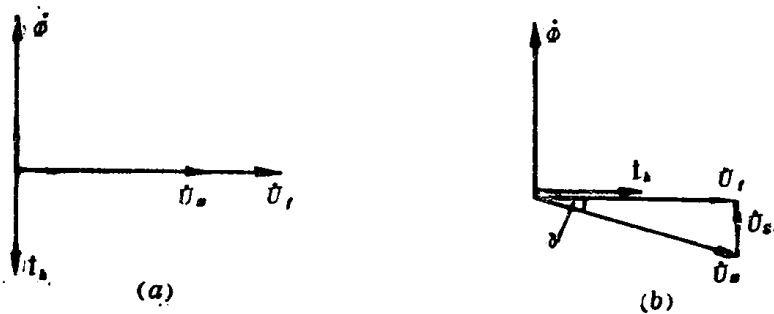


图1-2 准同期条件分析
(a) $\delta = 0$; (b) $\delta \neq 0$

$$i_{h,m}'' = 1.8\sqrt{2}I_h'' \quad (1-4)$$

冲击电流的电动力对发电机绕组产生影响，由于定子绕组端部的机械强度最弱，所以须特别注意对它所造成的危害，因此冲击电流必须加以限制。

(二) 合闸相角差 δ_0 。

设并列时断路器两侧电压矢量如图 1-2 (b) 所示，即

(1) $U_f = U_x$ 电压幅值相等；

(2) $f_f = f_x$ 频率相等；

(3) $\delta_0 \neq 0$ 合闸瞬间存在较小的相角差 δ_0 。

这时发电机为空载情况，电势与端电压相等，冲击电流的有效值为

$$I_h'' = \frac{2E_q''}{X_q'' + X_x} \sin \frac{\delta_0}{2} \quad (1-5)$$

式中 X_q'' ——发电机交轴次暂态电抗；

E_q'' ——发电机交轴次暂态电势。

显然，这时冲击电流主要为有功电流分量，说明合闸后发电机与系统间有功功率立刻进行交换，使机组联轴受到突然冲击，这对机组和系统运行是不利的。为了保证机组安全运行，一般将有功冲击电流限制在较小数值。参照 (1-4) 式，可求出其冲击电流最大瞬时值。

设待并发电机电压与系统电压之差为 \dot{U}_s ，当 \dot{U}_f 与 \dot{U}_x 间既存在幅值差，又存在相角差时，这时 \dot{U}_s 所产生的冲击电流可综合以上两种典型情况进行分析。

(三) 频率不相等

设待并发电机的电压矢量图如图 1-3 所示，即

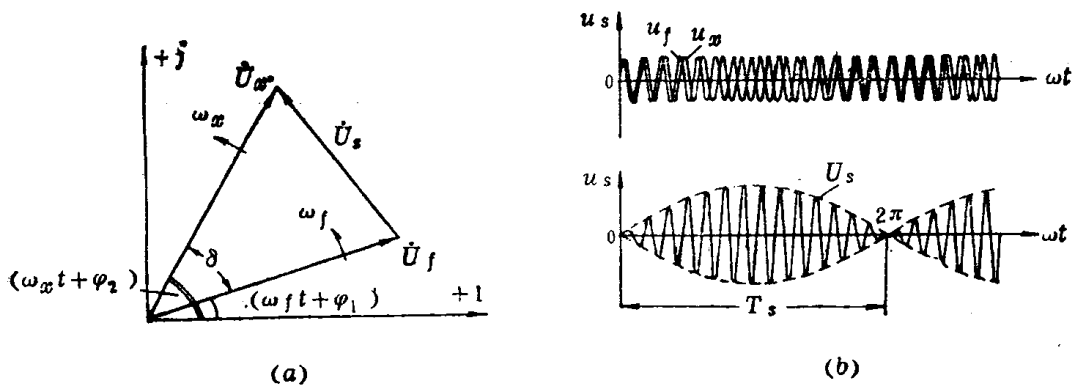


图1-3 脉动电压
(a) 矢量图; (b) 波形图

$$U_f = U_x \quad \text{电压幅值相等}$$

$$f_f \neq f_x \quad \text{或}$$

$$\omega_f \neq \omega_x \quad \text{频率不等}$$

这时断路器DL两侧电压 U_s 为脉动变化,其值可描述如下:

$$u_s = U_f \sin(\omega_f t + \varphi_1) - U_x \sin(\omega_x t + \varphi_2)$$

设初始角 $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$, 则

$$u_s = 2 U_f \sin\left(\frac{\omega_f - \omega_x}{2} t\right) \cos\left(\frac{\omega_f + \omega_x}{2} t\right) \quad (1-6)$$

如果 $U_s = 2 U_f \sin\left(\frac{\omega_f - \omega_x}{2} t\right)$ 为脉动电压的幅值, 则

$$u_s = U_s \cos\left(\frac{\omega_f + \omega_x}{2} t\right) \quad (1-7)$$

即 u_s 波形可以看成是幅值为 U_s , 频率接近于工频的交流波形。

又

$$\omega_s = \omega_f - \omega_x$$

为滑差角频率。

图 1-3 电压矢量的相角差 δ 为

$$\delta = \omega_s t \quad (1-8)$$

于是

$$U_s = 2 U_f \sin \frac{\omega_s t}{2} = 2 U_f \sin \frac{\delta}{2} = 2 U_x \sin \frac{\delta}{2} \quad (1-9)$$

U_s 为正弦脉动波,其最大幅值为 $2 U_f$,所以 U_s 又称为脉动电压, \dot{U}_s 的矢量图及其瞬时值波形如图 1-3 所示。脉动电压 u_s 为频率接近于工频、振幅作脉动变化的电压(见图 1-3, b)。如用矢量分析,则可设想系统电压 \dot{U}_x 固定,而待并发电机的电压 \dot{U}_f 以滑差角频率 ω_s 对 \dot{U}_x 转动,当相角差 δ 从 0 到 π 时, \dot{U}_s 的幅值相应地从零变到最大值, δ 从 π 变到 2π (重合)时, \dot{U}_s 的幅值又从最大值回到零。转一圈的时间为脉动周期 T_s 。

由于滑差角频率 ω_s 与滑差频率 f_s 间具有下列关系:

$$\omega_s = 2\pi f_s \quad (1-10)$$

所以脉动周期

$$T_s = \frac{1}{f_s} = \frac{2\pi}{\omega_s} \quad (1-11)$$

当滑差角频率用标么值表示时

$$\omega_{s*} = \frac{2\pi f_s}{2\pi f_e} = \frac{f_s}{50} = \frac{\omega_s}{2\pi f_e} \quad (1-12)$$

式中 f_e ——额定频率，我国电网的额定频率为 50Hz。

脉动电压周期 T_s 、滑差频率 f_s 和滑差角频率 ω_s 都可用来表示待并发电机频率与系统频率之间相差的程度。由式 (1-8) 可知，相角差 δ 是时间的函数，所以并列时合闸相角差 δ_0 与发出合闸信号的时间有关。如果发出合闸信号的时间不恰当就有可能在相角差较大时合闸，以致引起较大的冲击电流。还须指出，如果频率差较大，即使合闸时的相角差 δ_0 满足要求，但由于待并发电机需经历一个剧烈的暂态过程才能进入同步运行状态，严重时甚至失步。因而也是不允许的。

图 1-4 为待并发电机组进入同步运行的暂态过程示意图。

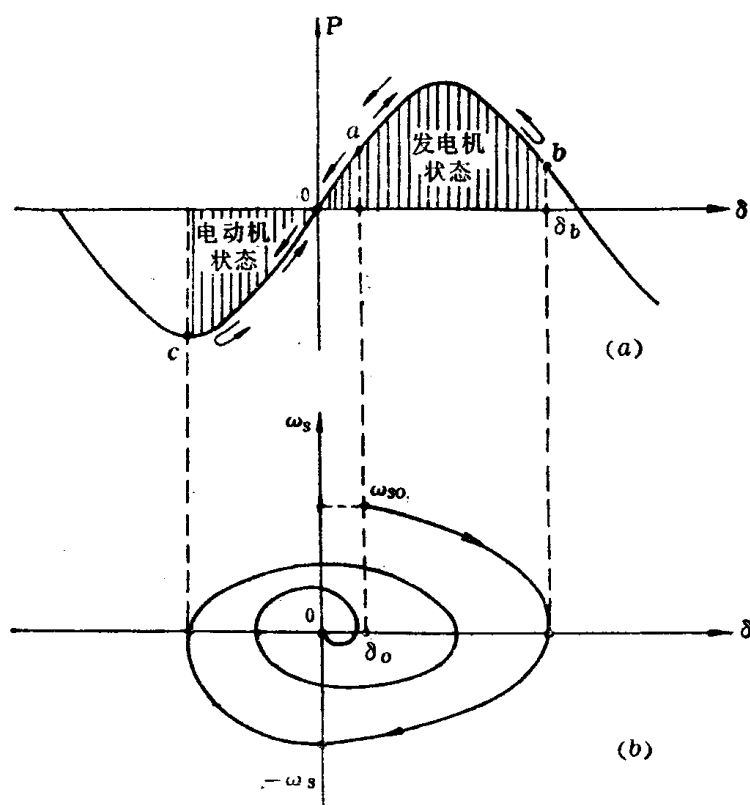


图1-4 并列的同步过程分析

众所周知，当发电机组与系统间进行有功功率交换时，如果发电机的电压 \dot{U}_1 超前系统电压 \dot{U}_s ，发电机发出功率，则发电机将制动而减速。反之，当 \dot{U}_1 落后 \dot{U}_s ，发电机吸收功率时，则发电机将加速。所以交换功率的方向与相角差 δ 的正负有关。

下面定义发电机发出功率为“发电机电状态”，发电机吸收功率为“电动机状态”。现设 ω_1 大于 ω_s ，令合闸时发电机超前的相角为 δ_0 （图中 a 点）。合闸后发电机处于“发电机电状态”，即处于制动过程。发出功率沿功角特性到达 b 点时 ω_1 等于 ω_s ，这时发电机仍处于“发电机电状态”，所以 ω_1 继续减小。由于 ω_1 小于 ω_s ，所以 δ 逐渐减小。发电机功率沿特性曲线往回摆动到达坐标原点时，因为 ω_1 小于 ω_s 相角差 δ 开始变负，交换功率变负，发电机组处于“电动机状态”发电机重新加速交换功率沿特性曲线变动直到 c 点 ω_1 等于 ω_s 。

时，相角差 δ 又往反方向运动。这样来回摆动直到进入同步运行时为止。

显然，进入同步状态的暂态过程与合闸时滑差角频率 ω_s 的大小有关，当 ω_s 较小时，到达最大相角时 b 点的 δ_b 较小，可以很快进入同步运行。当 δ_b 较大时，如图所示，则需经历较长时间振荡才能进入同步运行。如果 ω_s 很大， b 点超出 180° ，则将导致失步。所以合闸时 ω_s 的极限值应根据发电机能否进入同步运行的稳定条件进行校验。通常，在一般情况下并列时的 ω_s 值远小于上述极限值，因此可以不必校验。但是当并列的发电机组与系统间的联系较弱时，也有可能需按稳定条件进行校验。

三、自同期并列

自同期并列操作是将一台未加励磁电流的发电机组升速到接近于系统频率，在滑差角频率 ω 不超过允许值、且加速度小于给定值的条件下，首先合上并列断路器 DL ，接着立刻合上励磁开关 K_{Lr} ，给转子加上励磁电流，在发电机电势逐渐增长的过程中由系统将发电机拉入同步运行。

自同期并列最突出的优点是操作简单，在系统发生事故频率波动较大的情况下，发电机组仍能进行这种并列操作，并迅速投入电网运行。当系统发生事故时，要求备用机组迅速并网，采用这种并列方法较为有效。对于水轮发电机组一般应备有自同期并列装置，并将其作为处理系统事故的措施之一。

自同期并列方式不能用于两个系统间的并列操作，同时应该看到当发电机以自同期方式投入电网时，在投入瞬间，未经励磁的发电机接入系统相当于系统经发电机次暂态电抗 X_d'' 短路，因而不可避免地要引起冲击电流。如图 1-5 所示。

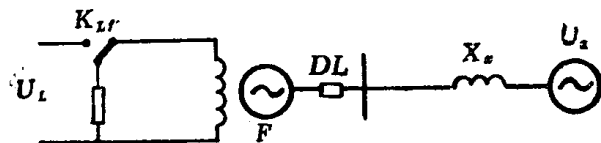


图1-5 自同期并列简图

自同期并列的冲击电流的周期分量，可由下式求得

$$I_h'' = \frac{U_s}{X_d'' + X_s} \quad (1-13)$$

式中 U_s ——归算到发电机端的系统电压；

X_s ——归算后的系统等值电抗。

这时，发电机母线电压 U_f 为

$$U_f = \frac{U_s}{X_d'' + X_s} X_d'' \quad (1-14)$$

(1-13) 式和 (1-14) 式表明，当机组一定时，自同期并列的冲击电流主要决定于系统的情况，即决定于 U_s 和 X_s 。自同期时发电机电压值与冲击电流成正比。

由 (1-13) 式看出，自同期并列冲击电流总是小于发电机出口处的三相短路电流。它对发电机的影响应作具体分析，即使一般的中小型发电机组在设计时考虑了这一冲击电流，但是鉴于并列操作是属正常运行范畴，为了避免由于多次冲击可能造成积累作用而对发电机绝缘寿命造成不利影响，对自同期的应用规定了较严格的限制条件。

另外，发电机母线电压瞬时下降对其它用电设备的正常工作也产生影响，为此也需

进行校核计算。

目前，自同期并列方式只在系统发生事故情况下，为了迅速投入备用机组才被采用，所以大多用于中小容量的水轮发电机组。水轮机组的起动、转速控制等一系列操作都由程序控制，自同期装置对并列条件进行检测，一旦符合并列条件即合上并列断路器和励磁开关，因而简化了并列过程，缩短了并列操作时间。

第二节 准同期并列的基本原理

在满足并列条件的情况下，采用准同期并列方法将待并发电机投入电网运行，只要控制得当就可使冲击电流很小，对电网没有扰动，这是准同期并列最突出的优点。因此准同期并列是电力系统正常运行中所采用的主要并列方式。

设并列断路器 DL 两侧电压分别为 \dot{U}_f 和 \dot{U}_x 。(1-2) 式所表示的准同期并列的理想条件在实际操作中一般很难满足。并列断路器 DL 主触头闭合瞬间所引起的冲击电流，以及进入同步运行状态的过程，决定于合闸瞬间的脉动电压 \dot{U}_r 和滑差角频率 ω_s 。因此，准同期并列主要对脉动电压 U_r 和滑差角频率 ω_s 进行检测和控制，并控制在合适的时间发出合闸信号，使合闸瞬间的 U_r 值在允许值以内。检测的信息取自 DL 两侧电源，而且主要是对 U_r 进行检测。为此，下面对脉动电压的变化规律进行分析。

一、脉动电压

为了简化起见，设待并发电机电压 \dot{U}_f 与系统电压 \dot{U}_x 的幅值相等，而 ω_f 与 ω_x 不等。令两矢量重合瞬间为起始点，这时 U_r 的表达式由 (1-7) 式和 (1-9) 式得

$$u_r = U_r \cos \frac{\omega_f + \omega_x}{2} t$$

$$U_r = 2 U_x \sin \frac{\omega_s t}{2}$$

脉动电压幅值 U_r 的变化如图 1-6 所示，为正弦脉动波形，它的最大幅值为 $2U_x$ ，其脉动周期 T_r 与 ω_s 有关。

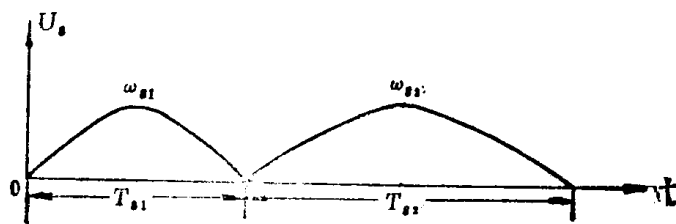


图1-6 $U_f = U_x$ 时 U_r 的波形

如果，并列两侧的电电压幅值不等，由图 1-1 (b) 的矢量图应用三角公式可求得 U_r 的值为

$$U_r = \sqrt{U_x^2 + U_f^2 - 2U_x U_f \cos \omega_s t} \quad (1-15)$$

当 $\omega_s t = 0$ 时， $U_r = |U_x - U_f|$ 为两电压幅值差。

当 $\omega_s t = \pi$ 时， $U_r = |U_x + U_f|$ 为两电压幅值和。

其脉动周期 T_r 只与 ω_s 有关，它的脉动波形见图 1-7，所以脉动周期 T_r 图 1-7 与图 1-6

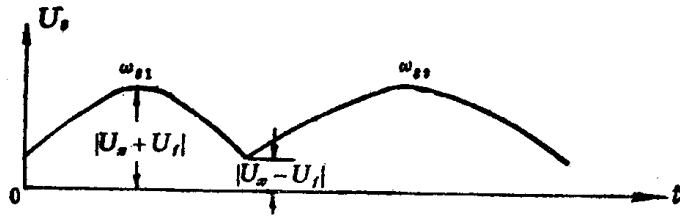


图1-7 U_f 与 U_x 不等时 U_s 的波形

相同。

图 1-6 和图 1-7 表明在 U_s 的脉动波形中, 载有准同期并列所需检测的信息——电压幅值差、频率差以及相角差 (δ) 随时间的变化规律, 从而可以通过计算求出合闸信号合适的发出时间。

1. 电压幅值差

电压幅值差 $|U_x - U_f|$ 对应于脉动电压 U_s 波形的最小幅值, 由图 1-7 得

$$U_{s,\min} = |U_x - U_f|$$

通过对 $U_{s,\min}$ 的测量, 就可判别 U_f 和 U_x 的电压幅值是否超出允许值。

2. 频率差

U_f 与 U_x 间的频率差就是脉动电压 U_s 的频率, 把它表达为滑差角频率 ω_s 的函数, 得

$$\left. \begin{aligned} f_1 - f_2 &= f_s \\ \omega_s &= 2\pi f_s \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

可见 ω_s 反映了频率差的大小。由(1-11)式的关系可知, 要求 ω_s 小于某一允许值, 就相当于要求脉动电压周期 T_s 大于某一给定值。

例如, 设滑差的允许值 $\omega_{s,y}$ 规定为 0.2%, 即

$$\omega_{s,y} = 0.2 \times \frac{2\pi f_e}{100} = 0.2\pi \text{ (rad/s)}$$

对应的 T_s 值为

$$T_s = \frac{2\pi}{\omega_{s,y}} = 10 \text{ (s)}$$

所以 U_s 的脉动周期必须大于 10 s, 这就是说测量 T_s 的值可以检测 ω_s 的大小。即频率差的大小。

3. 合闸相角差 (δ_0) 的控制

前面已经提及, 最理想的合闸瞬间是在 \dot{U}_f 与 \dot{U}_x 两矢量重合的瞬间。考虑到断路器操作机构和合闸回路控制电器的固有动作时间, 必须在两电压矢量重合之前发出合闸信号, 即取一提前量。

U_s 随相角差 δ 的变化规律为发出合闸信号的提前量计算提供了条件。目前, 准同期并列装置采用的提前量有越前相角和越前时间两种。 \dot{U}_f 与 \dot{U}_x 两矢量重合之前恒定角度 δ_0 发合闸信号的, 称为恒定越前相角并列装置。在 \dot{U}_f 与 \dot{U}_x 重合之前恒定时间 t_{v1} 发合闸信号的, 称为恒定越前时间并列装置。

二、自动准同期装置

为了使待并发电机组满足并列条件，自动准同期装置设置了三个控制单元。

(1) 频差控制单元 它的任务是检测 \dot{U}_1 与 \dot{U}_2 间的滑差角频率 ω_r ，且调节发电机转速，使发电机电压的频率接近于系统频率。

(2) 电压差控制单元 它的功能是检测 \dot{U}_1 与 \dot{U}_2 间的电压差，且调节发电机电压 U_1 ，使它与 U_2 间电压差值小于规定值，促使并列条件的实现。

(3) 合闸信号控制单元 检查并列条件，当待并机组的频率和电压都满足并列条件时，控制单元就选择合适的时间发出合闸信号，使并列断路器 DL 的主触头接通时，相角差 δ_0 接近于零或控制在允许范围以内。

自动准同期装置的组成可用图 1-8 表示。

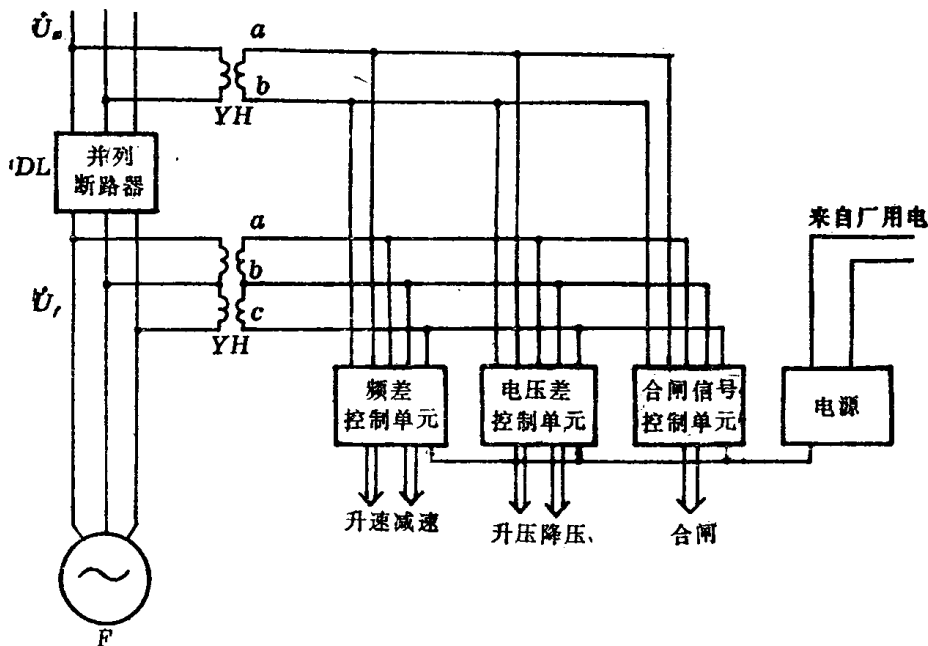


图1-8 自动准同期装置组成

在实际应用中，由于各发电厂的情况不同，自动化的程度可能差别较大，对发电机并列装置的要求也就不同。同步发电机的准同期并列装置按自动化程度可分为：

(1) 半自动准同期并列装置 这种并列装置没有频差控制单元和电压差控制单元，只有合闸信号控制单元。并列时，待并发电机的频率和电压由值班员监视和调整，当频率和电压都满足并列条件时，准同期并列装置就在合适的时间发出合闸信号。它与手动准同期并列的区别仅仅是合闸信号由该装置自动发出，而不是由值班人员手动发出。

(2) 自动准同期并列装置 如图 1-8 所示，其中设置了频率差控制单元、电压差控制单元和合闸命令控制单元。由于一般发电机都备有自动电压调节装置，因此在有人值班的发电厂中，发电机的电压往往由运行人员直接操作控制，毋需配置电压差控制单元，从而简化了并列装置的结构。在无人值班的发电厂中，自动准同期并列装置需设置具有电压自动调节功能的电压差控制单元。当同步发电机并列时，发电机的频率、或频率和电压都由并列装置自动调节。当满足并列条件时，就发出合闸信号。

三、准同期并列装置原理

在准同期并列操作中，合闸信号控制单元是准同期并列装置的核心部件，所谓准同期并列装置原理其实就是指该控制单元的原理。装置的控制原则是，当频率和电压都满足并列条件时，在 \dot{U}_1 与 \dot{U}_2 重合之前发出合闸信号。设两电压重合之前的信号称为提前量信号，并列装置的逻辑框图如图 1-9 所示。

前已提及，准同期并列装置按提前量的不同可分为恒定越前相角和恒定越前时间两种原理。

(一) 恒定越前相角准同期并列

装置中所取提前量信号是某一恒定相角 δ_{YJ} ，即在脉动电压 U_s 到达 $\delta = 0$ 之前的 δ_{YJ} 相角时发出合闸信号，对该装置工作原理的分析可用图 1-10 来表示。

为了简单起见，设 U_1 与 U_2 相等且都为额定值，由(1-9)式可知，相角差 δ 与 U_s 间存在着一定的对应关系。在

图 1-10 中，设越前相角为 δ_{YJ} ，它所对应的 U_s 电压值为 U_A 。现设断路器的合闸时间为 t_{DL} ，显然，当 ω_s 很小时，DL 合闸时的相角差就接近于 δ_{YJ} 值。当 $\omega_s = \omega_{syo} = \frac{\delta_{YJ}}{t_{DL}}$ 时，并列时的合闸相角差等于零。当 ω_s 大于 ω_{syo} 时，合闸相角差又将增大。与越前相角 δ_{YJ} 相对应的越前时间随滑差角频率 ω_s 而变，由于断路器 DL 的合闸时间 t_{DL} 近乎恒定，因而合闸时的相角差与 ω_s 有关。为了使合闸时冲击电流值不超过允许值，滑差角频率的允许值就必须限制在既不能过大又不能过小的范围以内。其值可根据参数计算求得。

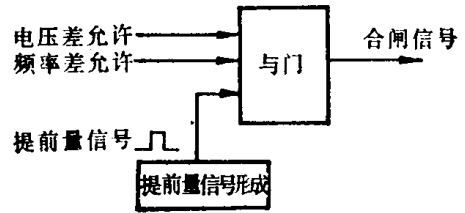


图 1-9 准同期并列装置的逻辑框图

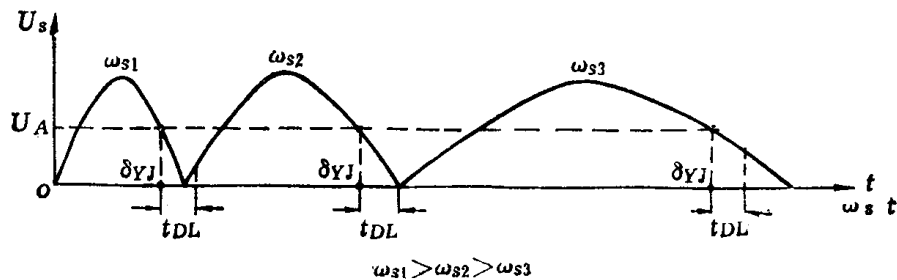


图 1-10 越前相角原理

(二) 恒定越前时间准同期并列

它所采用的提前量为恒定时间信号，即在脉动电压 U_s 到达两电压的重合点（ δ 等于零）之前 t_{YJ} 发出合闸信号。一般取 t_{YJ} 等于断路器合闸时间 t_{DL} ，因此利用恒定越前时间并列装置可以使合闸相角差 $\delta_0 = 0$ 。

在 $\delta = 0$ 之前的恒定时间 t_{YJ} 发出合闸信号，它对应的越前相角 δ_{YJ} 的值是随 ω_s 而变化的，其变化规律如图 1-11 所示。

由于 $\delta_{YJ} = \omega_s t_{YJ}$ 当 t_{YJ} 为恒定时，发出合闸脉冲时的越前相角与 ω_s 成正比。

虽然从理论上讲，按恒定越前时间原理工作的自动并列装置，可以使合闸相角差 δ_0 等于零。但实际上由于装置的越前时间信号具有一定的误差，以及断路器的合闸时间 t_{DL} 存在着分散性，因而并列时仍难免具有合闸相角误差，这就使并列时的允许滑差角