



高等学校教材

# 电力系统自动装置原理

( 第 二 版 )

上海交通大学 杨冠城 主编





## 内 容 提 要

全书共分五章;第一章主要阐述恒定越前时间自动并列装置的工作原理;第二章介绍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;第四章剖析一次调节、二次调节的动态行为以及调频的有关准则和实施框图;第五章主要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,也可供有关专业工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

电力系统自动装置原理/杨冠城主编.-2版.-北京:中国电力出版社,1995.11(1998.3重印)

高等学校教材

ISBN 7-80125-538-0

I. 电… I. 杨… II. 电力系统-自动化设备-高等学校-教材 IV. TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 22613 号

中国电力出版社出版

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

北京鑫正大印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

\*

1986 年 11 月第一版

1995 年 11 月第二版 1998 年 3 月北京第六次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 12.25 印张 276 千字

印数 61031—66060 册 定价 11.40 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

## 前 言

电力系统自动装置原理（第二版）是根据能源部高等学校电力工程类专业教学委员会1988年制订的教学大纲而编写的，其编写大纲经上述教学委员会自动远动教学组审定。

第二版增加了微机数字控制和大型发电机自动电压调节器（AVR）等有关内容，反映当前自动控制技术的发展方向。

全书共分五章，由上海交通大学杨冠城 [第一章、第二章第六节、第四章（第二节除外）、第五章]、周贵兴 [第二章（第六节除外）、第三章] 以及华北电力学院商国才（第四章第二节）编写。全书由杨冠城任主编。

本书承华中理工大学樊俊教授主审并提出许多宝贵意见，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，也可供有关专业人员以及工程技术人员参考。

由于编者水平有限，对于书中的错误，敬请读者批评指正。

编 者

1994年5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	4
第三节 恒定越前时间并列装置的合闸控制	15
第四节 频率差控制	15
第五节 数字式并列装置	31
第二章 同步发电机励磁自动控制系统	38
第一节 概述	38
第二节 同步发电机励磁系统	46
第三节 励磁系统中的整流电路	51
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	88
第六节 数字式自动电压调节器	91
第三章 励磁自动控制系统的动态特性	100
第一节 概述	100
第二节 励磁控制系统的传递函数	101
第三节 励磁自动控制系统的稳定性	108
第四节 励磁自动控制系统对电力系统稳定的影响	112
第四章 电力系统频率及有功功率的自动调节	127
第一节 电力系统的频率特性	127
第二节 调速器原理	135
第三节 电力系统频率调节系统及其特性	143
第四节 电力系统自动调频	157
第五节 电力系统的经济调度与自动调频	167
第五章 电力系统自动低频减载及其他安全自动控制装置	173
第一节 概述	173
第二节 自动低频减载	174
第三节 其他安全自动控制装置	186
参考文献	190

# 绪 论

## 一、电力系统及其运行

随着经济建设的发展，我国的电力工业正迅速发展。电力系统的规模日益扩大，发电设备的容量也相应增大，系统运行方式的变化越来越频繁。为了更好地保证安全、经济运行并保证电能质量，电力系统运行越来越依赖于自动控制技术的提高，从而促进了电力系统自动控制技术的不断发展。

电能在生产、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、输电网、配电和用电等设备所组成的电力系统，在运行中是一个有机的整体。电力系统分布在广阔的地区，其组成如图 0-1 所示。调度控制中心对所管辖的电力系统进行监视和控制，其主要任务是合理地调度所属各发电厂的出力，制定运行方式，及时处理电力系统运行中所发生的问题，确保系统的安全经济运行。

发电厂转换生产电能，按一次能源的不同又分为火电厂、水电厂、核电厂等不同类型的电厂。各类电厂的生产过程各不相同，控制规律各异，它们在电力系统运行中的任务也有所侧重，但是，安全经济地完成给于的发电任务是对各类电厂共同的要求。

配电网是直接向用户供电的地区电网。随着城乡经济建设的发展和电气化程度的提高，人们对供电可靠性也提出了更高的要求。

## 二、电力系统自动控制的划分

任何一个自动控制系统都可用图 0-2 所示的框图来表示。控制对象的运行状态信息传

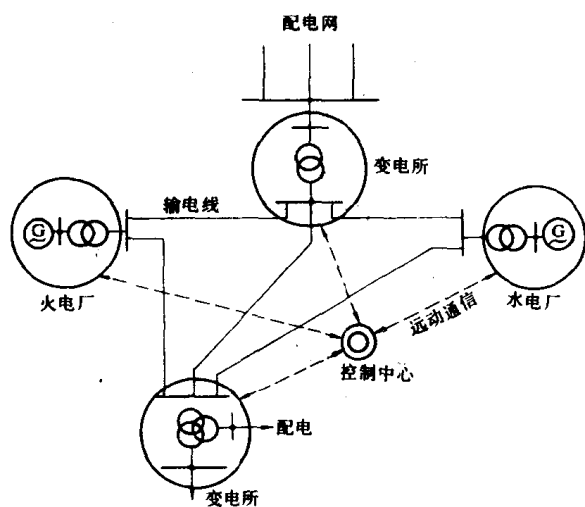


图 0-1 电力系统的组成

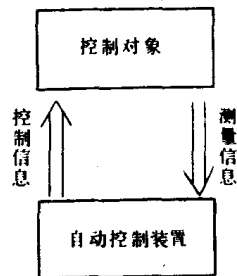


图 0-2 典型自动控制系统

送给自动控制装置，自动控制装置对送来的信息进行综合分析，按控制要求发出控制信息，即控制指令以实现其预定的控制目标。

根据电力系统的组成和运行特点，自动控制大致划分为如下几个不同内容的控制系统。

### 1. 电力系统自动监视和控制

电力系统自动监视和控制，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、变电所把反映电力系统运行状态的实时信息，由远动终端装置送至调度控制中心的计算机系统，由计算机及时地对电力系统的运行进行分析并通过人机联系系统显示出来，供运行人员参考。这样不仅为运行人员集中精力指挥电网运行创造条件，而且由于安全分析后所及时采取的预防性控制，可极大地提高电网运行的安全性。在计算机的经济运行软件支持下，还把电力系统的经济运行提高到一个新的水平。

### 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，如水电厂、火电厂、核电厂等，它们的动力设备截然不同，其控制要求和控制规律相差很大。火电厂中锅炉和汽轮机的自动控制系统与水电厂中水力机械的自动控制系统分属各自的专业对这一领域进行的研究。

电厂动力机械的自动控制是电厂自动控制的主要组成部分。现在新建的 200MW 以上的汽轮发电机组，需配置专用计算机进行监控。

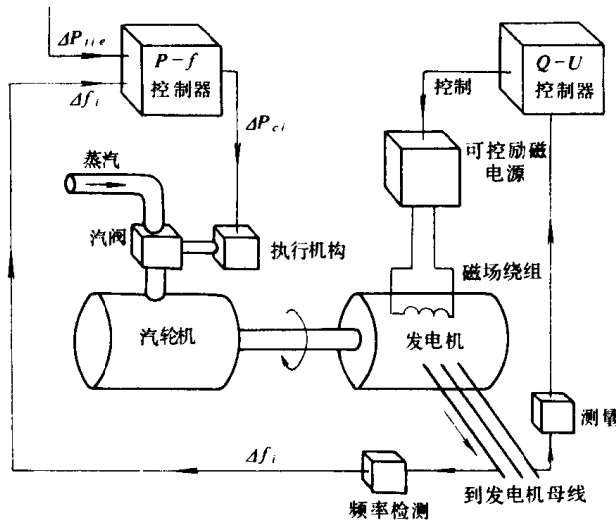


图 0-3 发电自动控制示意图

动装置。

电气设备的操作分正常操作和反事故操作两种类型。例如按运行计划发电机并网运行的操作为正常操作。电网突然发生事故，为防止事故扩大的紧急操作为反事故操作。针对电力系统的系统性事故采取相应对策的自动操作装置称为电力系统安全自动控制装置。电气设备操作的自动化是电力系统自动化的基础。

### 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

### 3. 电力系统自动装置

发电厂、变电所电气主接线设备运行的控制与操作的自动装置，是直接为电力系统安全、经济和保证电能质量服务的基础自动化设备。

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，它们还分别与电网的频率和发电机端电压的电能质量有关。如图 0-3 中所示的 P-f 控制器和 Q-U 控制器，是电力系统维持电能质量的自

功率自动控制进行较为深入讨论；同步发电机并网运行操作是电气设备正常运行操作的重要内容，作了较系统的介绍。

电力系统发生事故时，需采取各种自动控制措施以确保系统的安全运行。自动控制措施中所用自动装置原则上都属于本课程的研究内容。由于继电保护已自成体系并另设课程专门讲授，而涉及电力系统安全运行的自动装置则列为本课程的讲述内容。

由此可见，电力系统自动装置有两种类型：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程中讲授。涉及电力系统运行的基础知识在电力系统稳态分析、暂态分析等专业课程中讲授，本课程侧重于电力系统运行特点，在实施其自动控制时所遵循的规律和自动装置的组成及运行要求等方面进行阐述。

电力系统自动装置随着元器件的发展而不断更新，目前自动装置中用到的电子器件如线性电路、数字电路，从分立元件到可编程大规模集成电路等方面有关的知识，在电子技术课程中已讲授，本书不重复。

近年来，由于控制理论、信息论等方面的成就，大规模、超大规模集成电子器件不断推出；计算机技术和数据通信技术的发展，自动控制技术正面临着日新月异的形势；计算机控制技术在电力系统自动装置中已广为应用。我国广大科技工作者在这方面进行了卓有成效的研究，取得了可喜成绩。

鉴于自动控制装置不断更新，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，但着眼点还在于启发学生如何按照控制要求去构成装置的原理。

本书已注意到计算机技术在本领域中的应用，因此作了必要的充实，但内容也只是原理性的介绍。

根据教学大纲要求，本书分五章讲授：

(1) 第一章同步发电机自动并列。这是电厂运行中发电机组的一项重要操作，是自动操作装置的一个典型例子，对它的原理作了较为详细的叙述。

(2) 第二、三章为同步发电机励磁自动控制系统。这是发电机自动调节的一个典型应用。在此作了较为深入讨论。第二章介绍装置的原理和它的静态特性。第三章分析调节系统的动态行为。

(3) 第四章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。有功功率潮流是电力系统经济运行和系统运行方式的重要问题。本章就电力系统的频率特性和调频有关问题展开讨论，侧重于阐述控制系统特性及功率分配等问题。

(4) 第五章重点介绍按频率自动减载装置。这是电力系统事故情况下，较为典型防止事故扩大的安全自动装置。其它安全自动装置则结合电力系统运行就其实施原则作简要介绍。



# 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，任一母线电压瞬时值可表示为

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

式中  $U_m$ ——电压幅值；

$\omega$ ——电压的角频率；

$\varphi$ ——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电压的状态量。电网电压也常用相量  $\dot{U}$  来表示。

如图 1-1 (a) 所示，一台发电机组在未投入系统运行之前，它的电压  $u_G$  与并列母线电压  $u_x$  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断路器 DL 合闸作并网运行。这一系列操作称为并列操作。

随着负荷的波动，电力系统中发电机运行的台数也经常要变动。因此，同步发电机的并列操作是电厂的一项重要操作。另外，当系统发生某些事故时，也常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。

电力系统的容量在不断增大，同步发电机的单机容量也越来越大，大型机组不恰当的并列操作将导致严重后果。因此，对同步发电机的并列操作进行研究，提高并列操作的准确度和可靠性，对于系统的可靠运行具有很大的现实意义。

同步发电机组并列时遵循如下的原则：

(1) 并列断路器合闸时，冲击电流应尽可能小，其瞬时最大值一般不超过 1~2 倍的额定电流。

(2) 发电机组并入电网后，应能迅速进入同步运行状态，其暂态过程要短，以减小对电力系统的扰动。

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。

在电力系统正常运行情况下，一般采用准同期并列方法将发电机组投入运行。因此，这是本书主要介绍的内容。自同期并列方法已很少采用，只有当电力系统发生事故时，为了迅速投入水轮发电机组，过去曾采用自同期并列方法。随着自动控制技术的进步，现在也可用准同期法快速投运水轮发电机组。因此，对自同期并列方法本书只介绍它的一般原理。

### 二、准同期并列

设待并发电机组  $G$  已经加上了励磁电流，其端电压为  $\dot{U}_G$ ，调节待并发电机组  $\dot{U}_G$  的状

态参数使之符合并列条件的操作。如图 1-1 (a) 所示,  $DL$  为并列断路器,  $DL$  的另一侧为电网电压  $U_x$ 。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  $G$  进行控制使它符合并列条件, 然后发出  $DL$  的合闸信号。

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

设发电机电压的角频率为  $\omega_G$ , 电网电压  $U_x$  的角频率为  $\omega_x$ , 它们间的相量差  $\dot{U}_G - \dot{U}_x$  为  $\dot{U}_s$ 。计算并列时冲击电流的等值电路如图 1-1 (c) 所示。当电网参数一定时, 冲击电流决定于合闸瞬间的  $\dot{U}_s$  值。要求  $DL$  合闸瞬间的  $\dot{U}_s$  尽可能小, 其最大值应使冲击电流不超过允许值。最理想情况  $\dot{U}_s$  的值为零。这时  $DL$  合闸的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, 对电网无任何扰动。

综上所述, 发电机并列的理想条件为并列断路器两侧电源电压的三个状态量全部相等, 即图 1-1 (b) 中  $\dot{U}_G, \dot{U}_x$  两个相量完全重合并且同步旋转, 所以并列的理想条件可表达为

$$\begin{aligned}
 (1) & \quad \omega_G = \omega_x \text{ 或 } f_G = f_x, \text{ 即频率相等} \\
 (2) & \quad U_G = U_x, \text{ 即电压幅值相等} \\
 (3) & \quad \delta_s = 0, \text{ 即相角差为零 (合闸时电压差为零)}
 \end{aligned}
 \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1-2)$$

这时并列合闸的冲击电流等于零, 并且并列后发电机  $G$  与电网立即进入同步运行, 不发生任何扰动现象。可以设想, 如果待并发电机的调速器和调压器能按 (1-2) 式进行调节, 实现理想的并列操作, 则可极大地简化并列过程。

但是, 实际运行中待并发电机组的调节系统并不按 (1-2) 式的理想条件调节。因此三个条件很难同时满足。其实在实际操作中也没有这样苛求的必要。因为并列合闸时只要冲击电流较小, 不危及电气设备, 合闸后发电机组能迅速拉入同步运行, 对待并发电机和电网运行的影响较小, 不致引起任何不良后果。

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。下面分析如果同步发电机组并列时偏离 (1-2) 式的理想条件所引起的后果。

### (一) 电压幅值差

设发电机并列时的电压相量如图 1-2 (a) 所示, 即并列时: ①发电机频率  $f_G$  等于电网

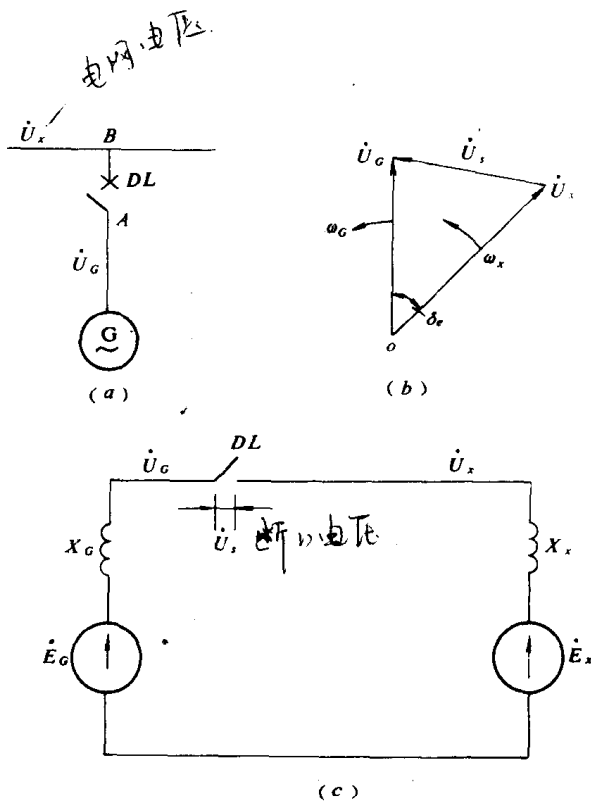


图 1-1 准同期并列

(a) 电路示意; (b) 相量图; (c) 等值电路图

频率  $f_x$ ; ②相角差  $\delta_c$  等于零; ③电压幅值不等,  $U_G \neq U_x$ 。则冲击电流的有效值为

$$I''_h = \frac{U_G - U_x}{X''_d + X_x} \quad (1-3)$$

式中  $U_G$ 、 $U_x$ ——发电机电压、电网电压有效值;

$X''_d$ ——发电机次暂态电抗;

$X_x$ ——电力系统等值电抗。

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

$$i''_{hm} = 1.8 \sqrt{2} I''_h \quad (1-4)$$

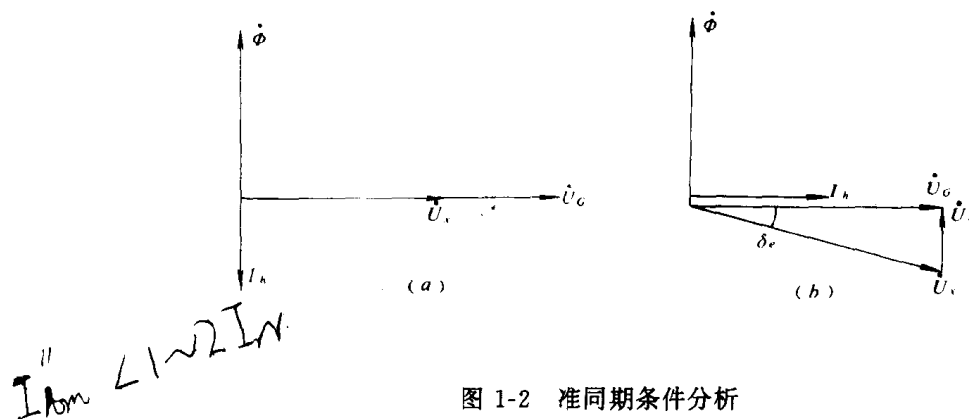


图 1-2 准同期条件分析

(a)  $\delta_c = 0$ ; (b)  $\delta_c \neq 0$

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。由于并列操作为正常运行操作, 冲击电流最大瞬时值限制在 1~2 倍额定电流以下为宜。

## (二) 合闸相角差

设并列合闸时, 断路器两侧电压相量如图 1-2 (b) 所示, 即

(1)  $U_G = U_x$ , 电压幅值相等;

(2)  $f_G = f_x$ , 频率相等;

(3)  $\delta_c \neq 0$ , 合闸瞬间存在相角差。

这时发电机为空载情况, 电动势即为端电压并与电网电压相等, 冲击电流的有效值为

$$I''_h = \frac{2E''_q}{X''_q + X_x} \sin \frac{\delta_c}{2} \quad (1-5)$$

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动势。

当相角差较小时, 这种冲击电流主要为有功电流分量, 说明合闸后发电机与电网间立刻交换有功功率, 使机组联轴受到突然冲击, 这对机组和电网运行都是不利的。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电网电压之差为  $\dot{U}$ , 当  $\dot{U}_G$  与  $\dot{U}_x$  间既存在幅值差, 又存在相角差,

这时  $u_s$  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相量如图 1-3 所示, 且有  $U_G = U_x$ , 电压幅值相等;  $f_G \neq f_x$  或  $\omega_G \neq \omega_x$ , 频率不相等。

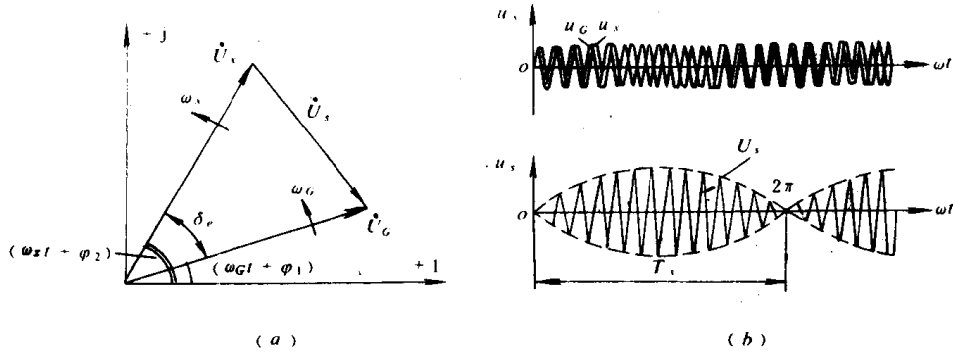


图 1-3 脉动电压

(a) 相量图; (b) 波形图

这时断路器 DL 两侧间电压差  $u_s$  为脉动电压, 对  $u_s$  的描述为

$$u_s = U_G \sin(\omega_G t + \varphi_1) - U_x \sin(\omega_x t + \varphi_2)$$

设初始角  $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$ , 则

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

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

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

由 (1-7) 式可知  $u_s$  波形可以看成是幅值为  $U_s$ 、频率接近于工频的交流电压波形。

又  $\omega_s = \omega_G - \omega_x$  为滑差角频率, 图 1-3 所示两电压相量间的相角差为

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

于是

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

由此可见,  $u_s$  为正弦脉动波, 其最大幅值为  $2U_G$  (或  $2U_x$ ), 所以  $U_s$  又称为脉动电压。

$\dot{U}_s$  的相量图及其瞬时值波形如图 1-3 (a)、(b) 所示。如用相量分析, 则可设想系统电压  $\dot{U}_x$  固定, 而待并发电机的电压  $\dot{U}_G$  以滑差角频率  $\omega_s$  对  $\dot{U}_x$  转动。当相角差  $\delta_s$  从 0 到  $\pi$  变动时,  $U_s$  的幅值相应地从零变到最大值  $2U_G$ ; 当  $\delta_s$  从  $\pi$  到  $2\pi$  (重合) 变动时,  $U_s$  的幅值又从最大值回到零。转动一圈的时间为脉动周期  $T_s$ 。

由于滑差角频率  $\omega_s$  与滑差频率  $f_s$  间具有下列关系

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

所以脉动周期为

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

当滑差角频率用标么值表示时，则有

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

式中  $f_c$ ——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  $\omega_s$  都可用来表示待并发电机的频率与电网频率之间相差的程度。由 (1-8) 式可知，相角差  $\delta_c$  是时间的函数，所以并列时合闸相角差  $\delta_c$  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。同时也可看到，如果发出合闸信号的时间恰当，就有可能在两电压重合的时间合闸，从而使冲击电流等于零。还需指出，如果频率差较大，即使合闸时的相角差  $\delta_c$  很小，满足要求，但这时待并发电机需经历一个很长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。

众所周知，当发电机组与电网间进行有功功率交换时，如果发电机的电压  $\dot{U}_G$  超前电网电压  $\dot{U}_x$ ，发电机发出功率，则发电机将制动而减速。反之，当  $\dot{U}_G$  落后  $\dot{U}_x$  时，发电机吸收功率，则发电机将加速。所以交换功率的方向与相角差  $\delta_c$  的正负有关。

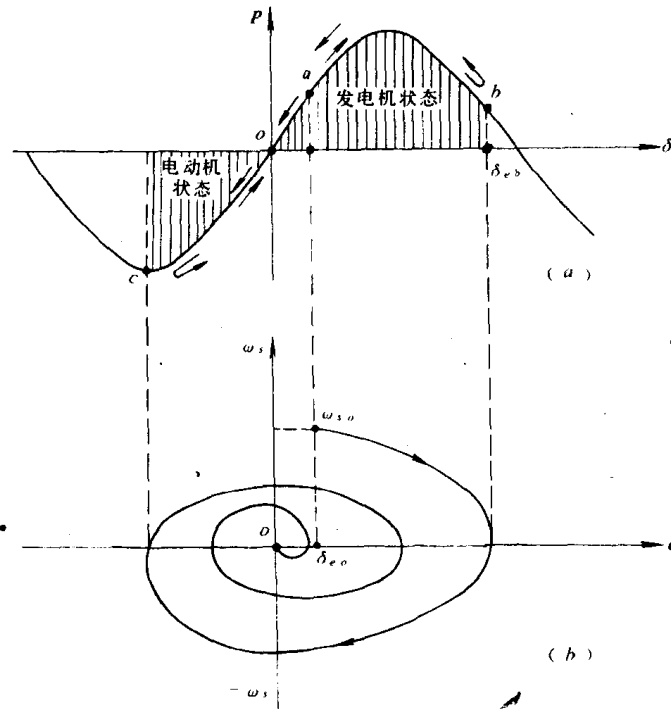


图 1-4 并列的同步过程分析

下面定义发电机发出功率为“发电机状态”；发电机吸收功率为“电动机状态”。现设

原动机的输入功率恒定不变，又  $\omega_G$  大于  $\omega_x$ ；令合闸时的相角差为  $\delta_{e0}$ （图中  $a$  点），并为超前情况。可见合闸后发电机处于“发电机状态”而受到制动。发出功率沿功角特性到达  $b$  点时  $\omega_G$  等于  $\omega_x$ ，这时发电机仍处于“发电机状态”，所以  $\omega_G$  继续减小，由于  $\omega_G$  小于  $\omega_x$ ，所以  $\delta_e$  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  $\omega_G$  小于  $\omega_x$  而使相角差  $\delta_e$  开始变负，交换功率变负，发电机组处于“电动机状态又重新加速，交换功率沿特性曲线变动直到  $\omega_G$  等于  $\omega_x$  图中的  $C$  点，相角差  $\delta_e$  又往反方向运动。这样来回摆动由于阻尼等因素直到进入同步运行时为止。

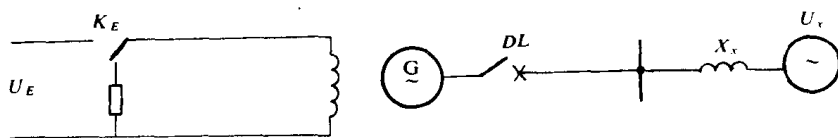
显然，进入同步状态的暂态过程与合闸时滑差角频率  $\omega_{s0}$  的大小有关。当  $\omega_{s0}$  较小时，到达最大相角  $b$  点时的  $\delta_{e0}$  较小，可以很快进入同步运行。当  $\omega_{s0}$  较大时，如图 1-4 所示，则需经历较长时间振荡才能进入同步运行（如果  $\omega_{s0}$  很大， $b$  点超出  $180^\circ$ ，则将导致失步）。所以合闸时  $\omega_{s0}$  的极限值应根据发电机能否进入同步运行的稳定条件进行校验。在一般情况下，并列时的  $\omega_s$  值远小于上述极限值，因此可以不必校验。但是，当并列的发电机组与电网间的联系较弱时，也有可能需按稳定条件对  $\omega_{s0}$  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电网频率，滑差角频率  $\omega_s$  不超过允许值，且机组的加速度小于某一给定值的条件下，首先合上并列断路器 DL，接着立刻合上励磁开关  $K_E$ ，给转子加上励磁电流，在发电机电动势逐渐增长的过程中，由电力系统将并列的发电机组拉入同步运行。

自同期并列最突出的优点是控制操作非常简单，限于当时控制技术水平，在电力系统发生事故、频率波动较大的情况下，应用自同期并列可以迅速把备用机组投入电网运行，所以曾一度广泛应用于水轮发电机组，作为处理系统事故的重要措施之一。

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电网，相当于电网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（见图 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

$$I''_h = \frac{U_r}{X''_d + X_r} \quad (1-13)$$

式中  $U_r$ ——归算到发电机端的电网电压；

$X_r$ ——归算后的电网等值电抗。

这时，发电机母线电压  $U_G$  为

$$U_G = \frac{U_x}{X''_d + X_x} X''_d \quad (1-14)$$

(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  $U_x$  和  $X_x$ 。自同期时发电机的端电压值  $U_G$  与冲击电流成正比。

另外, 必须指出: 发电机母线电压瞬时下降对其它用电设备的正常工作将产生影响, 为此也需受到限制, 所以自同期并列方法现已很少采用。

## 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组投入电网运行, 前已述及只要控制得当就可使冲击电流很小且对电网扰动甚微。因此准同期并列是电力系统运行中的主要并列方式。

设并列断路器  $DL$  两侧电压分别为  $\dot{U}_G$  和  $\dot{U}_x$ ; 并列断路器  $DL$  主触头闭合瞬间所出现的冲击电流值以及进入同步运行的暂态过程, 决定于合闸时的脉动电压  $\dot{U}_s$  和滑差角频率  $\omega_s$ 。因此, 准同期并列主要对脉动电压  $\dot{U}_s$  和滑差角频率  $\omega_s$  进行检测和控制, 并选择合适的时间发出合闸信号, 使合闸瞬间的  $\dot{U}_s$  值在允许值以内。检测的信息也就取自  $DL$  两侧的电压, 而且主要是对  $\dot{U}_s$  进行检测并提取信息。现对脉动电压的变化规律进行分析。

### 一、脉动电压

为便于分析问题, 设待并发电机电压  $\dot{U}_G$  与电网电压  $\dot{U}_x$  的幅值相等, 而  $\omega_G$  与  $\omega_x$  不等, 因此是作相对运动的两个电压相量。令两电压相量重合瞬间为起始点, 这时  $U_s$  的表达式由 (1-7) 式和 (1-9) 式得

$$u_s = U_s \cos \frac{\omega_G + \omega_x}{2} t$$

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

脉动电压幅值  $U_s$  的变化如图 1-6 所示, 为正弦脉动波形, 它的最大幅值为  $2U_x$ , 其脉动周期与  $\omega_s$  的关系见 (1-11) 式。

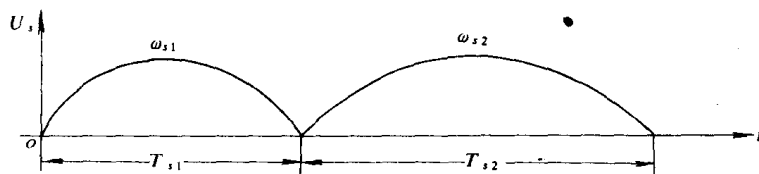


图 1-6  $U_G = U_x$  时  $U_s$  的波形

如果并列断路器  $DL$  两侧的电压幅值不相等, 由图 1-1 (b) 的相量图, 应用三角公式可求得  $U_s$  的值为

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

当  $\omega_s t = 0$  时,  $U_s = |U_G - U_x|$  为两电压幅值差;

当  $\omega_s t = \pi$  时,  $U_s = U_G + U_x$  为两电压幅值和;

两电压幅值不等时  $U_s$  电压波形如图 1-7 所示, 由于脉动周期  $T_s$  只与  $\omega_s$  有关, 所以图 1-7 中的脉动电压周期  $T_s$  表达得与图 1-6 相同。

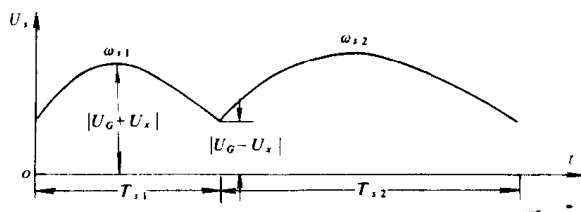


图 1-7  $U_G$  与  $U_x$  不等时  $U_s$  的波形

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、

频率差以及相角差随时间的变化规律。因而可以利用它为自动并列装置提供并列条件的信息以及选择合适的合闸信号发出时间。

### 1. 电压幅值差

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

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

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

### 2. 频率差

$U_G$  与  $U_x$  间的频率差就是脉动电压  $U_s$  的频率  $f_s$ , 它与滑差角频率  $\omega_s$  的关系如 (1-10) 式所示

$$\omega_s = 2\pi f_s$$

可见  $\omega_s$  反映了频率差  $f_s$  的大小。由 (1-11) 式的关系可知, 要求  $\omega_s$  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, 设滑差角频率的允许值  $\omega_{s, y}$  规定为 0.2%, 即

$$\begin{aligned} \omega_{s, y} &\leq 0.2 \times \frac{2\pi f_e}{100} \quad 0.2\% \times \omega_e \\ &\leq 0.2\pi \text{ (rad/s)} \end{aligned}$$

对应的脉动电压周期  $T_s$  值为

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

所以  $U_s$  的脉动周期  $T_s$  大于 10s 才满足  $\omega_{s, y}$  小于 0.2% 的要求。这就是说测量  $T_s$  的值可以检测待并发电机组与电网间的滑差角频率  $\omega_s$  的大小, 即频率差的大小。

### 3. 合闸相角差 $\delta_c$ 的控制

前面已经提及, 最理想的合闸瞬间是在  $\dot{U}_G$  与  $\dot{U}_x$  两相量重合的瞬间。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, 必须在两电压相量重合之前发出合闸信号, 即取一提前量。



$U$  随相角差  $\delta$  的变化规律为发出合闸信号的提前量计算提供了依据。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。 $\dot{U}_G$  与  $\dot{U}_x$  两相量重合之前恒定角度  $\delta_{y,j}$  发出合闸信号的, 称为恒定越前相角并列装置。在  $\dot{U}_G$  与  $\dot{U}_x$  重合之前恒定时间  $t_{y,j}$  发出合闸信号的, 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  $\dot{U}_G$  与  $\dot{U}_x$  间的滑差角频率  $\omega_s$ , 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  $\dot{U}_G$  与  $\dot{U}_x$  间的电压差, 且调节发电机电压  $U_G$  使它与  $U_x$  间的电压差值小于规定允许值, 促使并列条件的形成。

(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, 合闸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  $\delta$  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, 同步发电机的准同期并列装置按自动化程度可分为:

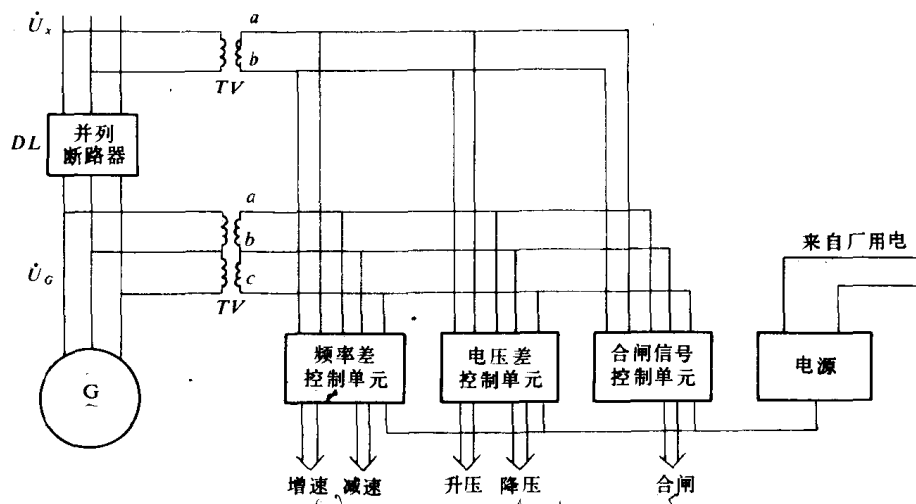


图 1-8 自动准同期装置组成

(1) 半自动准同期并列装置。这种并列装置没有频差调节和电压调节功能, 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运行人员监视和调整, 当频率和电压都满足并列条件时, 并列装置就在合适的时间发出合闸信号。它与手动并列的区别仅仅是合闸信号由该装置经判断后自动发出, 而不是由运行人员手动发出。

(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信号控制单元。由于发电机一般都配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, 不需配置电压差控制单元, 从而简