



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

DIANLI XITONG ZIDONGHUA

# 电力系统自动化

(第五版)

李先彬 主 编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

DIANLI XITONG ZIDONGHUA  
**电力系统自动化**  
( 第五版 )

主 编 李先彬  
编 写 张建华 赵冬梅  
主 审 樊 俊 温增银



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

全书共分为8章,主要包括同步发电机的自动准同期、电力系统电压的自动调节、自动励磁调节系统的动态特性与有关问题、电力系统调度自动化引论、电力系统运行的状态估计、电力系统的安全调度与运行动态检测、电力系统的自动调频与经济调度、电力系统低频自动减负荷。另外,还附有必要的整定计算机及例题。

本书主要作为普通高等学校电气工程及其自动化专业的教材,也可作为成人高等教育、高职高专教育的教材,同时可供相关工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

电力系统自动化/李先彬主编. —5版. —北京:中国电力出版社,2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5083-5281-7

I. 电... II. 李... III. 电力系统—自动化—高等学校—教材  
IV. TM76

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第033796号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

1981年12月第一版

2007年6月第五版 2007年6月北京第十一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 16.5印张 400千字

印数 62551—66550册 定价 28.00元

## 敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

# 前 言

本书四、五版是在本书的第三版的基础上进行修订的。由于第三版的修订是按照 1991 年高等学校电力工程专业教学委员会自动远动小组通过的大纲进行的,因此本版仍在这一大纲的框架内进行修订。

从 1991 年到 2007 年已历 17 年,本书较充分地考虑了这期间在电力系统自动化方面的技术进展及试行电力市场的有关经验。

我国幅员广阔,发展不够平衡,在电力系统自动化方面,模拟装置与数字设备并存,所以本版对两类装置都作了介绍,以利于读者可能面对的多种工作环境。

高电压大电流晶闸管的普遍应用,使超高压线络及某些供电线路都能较好地进行电压调整,以改善整个系统的电能质量及设备的运行安全,因此第二章改为电力系统电压的自动调节。

基于全球定位卫星的同步矢量测量已在我国获得了普遍的重视,探讨与试运行的结果接连不断。同步矢量测量不仅可用于电力系统的动态监测,而且使电力系统工作者长期以来盼望的对暂态稳定过程进行监测、预报,并采取及时的救急措施,令即将遭到破坏的系统重新回到同步运行状态的前景,现在已变得相当光明,本书对此也作了必要的讨论。

在分析励磁系统的动态特性时,本版仍沿用综合阻尼力矩的概念,并增加了某些内容。

鉴于我国对欧、美近年来多次电网严重停电事故及其预防性措施的重视,和广域测量系统在我国电网间的迅速发展,在第八章增加一节“电力系统低压减载简述”。

注有“\*”的节仅供教学参考。第四版出版后,接到读者来信,指出书中不少图、文不符之处,见微而详尽。除认真吸取、改正外,当今之世,这种精神实为难得而可贵,值得编者学习,并表示深深的谢意。

本版仍由李先彬同志主编,由张建华、赵冬梅两位年轻同志参编,张建华负责全书的校订工作。

本书由华中科技大学樊俊教授、温增银教授主审。樊俊教授历任本书主审,对本书历版提出了不少宝贵的意见,并对本书的修订给了很大的支持与关怀,在此表示深深的谢意。

由于条件与水平的限制,且增加了一些初次教学的内容,所以书中一定存在不少缺点与错误,希望读者批评指正。

编 者



# 目 录

## 前言

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 绪论                     | 1   |
| 第一章 同步发电机的自动准同期        | 5   |
| 第一节 概述                 | 5   |
| 第二节 数值角差、整步电压与越前时间     | 9   |
| 第三节 自动准同期装置举例          | 16  |
| 第四节 微机电液调速器的自动准同期功能简介  | 27  |
| 第二章 电力系统电压的自动调节        | 30  |
| 第一节 电力系统运行电压的有关问题      | 30  |
| 第二节 同步发电机的励磁系统         | 39  |
| 第三节 励磁系统中转子磁场的建立与灭磁    | 45  |
| 第四节 电力系统自动调压器的概念与基本框图  | 53  |
| 第三章 自动励磁调节系统的动态特性与有关问题 | 82  |
| 第一节 概述                 | 82  |
| 第二节 自动励磁调节系统的稳定性       | 84  |
| 第三节 线性化的同步发电机动态方程式     | 94  |
| 第四节 励磁调节对电力系统稳定的影响     | 101 |
| 第五节 励磁系统对暂态稳定的影响       | 114 |
| * 第六节 综合阻尼力矩系数简介       | 116 |
| 第四章 电力系统调度自动化引论        | 120 |
| 第一节 电力系统调度的主要任务        | 120 |
| 第二节 电力系统的分区、分级调度管理     | 121 |
| 第三节 电力系统调度自动化控制系统的功能概述 | 122 |
| 第四节 电力系统调度自动化控制系统简介    | 125 |
| 第五节 电力系统调度自动化的主要内容     | 129 |
| 第五章 电力系统运行的状态估计        | 134 |
| 第一节 测量系统误差的随机性质        | 134 |
| 第二节 最小二乘法估计            | 138 |
| 第三节 电力系统运行状态的数学模型      | 144 |
| 第四节 电力系统最小二乘法状态估计      | 150 |
| 第五节 $P-Q$ 分解法的状态估计     | 159 |
| 第六节 电力系统运行状态估计框图       | 165 |
| 第六章 电力系统的安全调度与运行动态检测   | 171 |
| 第一节 导论                 | 171 |

|             |                                                    |            |
|-------------|----------------------------------------------------|------------|
| 第二节         | 电力系统运行状态的安全分析 .....                                | 175        |
| 第三节         | 电力系统安全调度总框图简介 .....                                | 192        |
| 第四节         | 电力系统稳定性在线分析简介 .....                                | 194        |
| * 第五节       | 自回归 AR(Autoregression)随机过程(Random Process)简介 ..... | 209        |
| <b>第七章</b>  | <b>电力系统的自动调频与经济调度 .....</b>                        | <b>211</b> |
| 第一节         | 概述 .....                                           | 211        |
| 第二节         | 调频、电力市场与调频方程式 .....                                | 214        |
| 第三节         | 分区调频 .....                                         | 221        |
| 第四节         | 电力系统调频负荷的经济分配 .....                                | 226        |
| 第五节         | 自动发电量控制(AGC)系统简介 .....                             | 231        |
| <b>第八章</b>  | <b>电力系统低频自动减负荷 .....</b>                           | <b>238</b> |
| 第一节         | 概述 .....                                           | 238        |
| 第二节         | 低频自动减负荷的工作原理与各轮最佳断开功率的计算 .....                     | 242        |
| 第三节         | UFLS 原理框图及有关问题 .....                               | 248        |
| 第四节         | 减负荷装置 .....                                        | 250        |
| * 第五节       | 电力系统低压减载简述 .....                                   | 252        |
| <b>参考文献</b> | <b>.....</b>                                       | <b>257</b> |

## 绪 论

现在,电能已经成为国计民生的主要能源。一个完整的电能生产与消费网络由发电、输电、配电及用电等几部分组成,其中配电及用电部分不属本专业的范畴,因此本书所指的电力系统只限于由发电厂、变电站及输电线路组成的电力网络。由于一个电力系统中所包含的厂、站及线路的数量很大,达数百个,且纵横联线,在控制系统的分类中,它属于“复杂系统”;而且分布辽阔,大者达千多千米,小的也有几百千米,加上电能在生产与消费过程中的不可储藏性,因此又是很有特点的复杂系统。它不但要求每一时刻发出的总电能等于系统消费的总电能,而且要求所有的中间传输环节都畅通无阻,使发出的电能有秩序地输送开来,耗尽无遗。对于电力系统,除了发不敷用,会使部分用户停电,造成用户的损失外,就是中间传输环节的任何阻滞,无论这种阻滞是人为的还是外界因素造成的设备故障,都会在发电与用电两端同时发生“过剩”与“不足”两种截然相反的不正常状态,严重时系统可能因此而解列、崩溃,造成大面积恶性停电,使国民经济遭受重大损失。因此,在积累了长期的运行经验后,我国对电力系统的运行提出了“安全第一,预防为主”的指导方针。电力系统自动化就是为电力系统的安全、可靠及经济地运行服务,目的性是十分明确的。

目前我国正在逐步推行电力市场的改革,实行“厂、网分开”管理,电量“竞价上网”

的政策。近年来,借鉴国外发生的多起大范围停电的恶性事故,在电力发展方面,我国坚持统一规划,力争做到电力发展与国民经济发展相协调,电网建设与电源建设相协调,送端和受端相协调。电网和电源要统一规划,电网建设要适度超前的方针。在电力系统的运行方面,确立了“统一调度,分级管理”的原则。分级管理与统一调度对电力市场的正确运作是不可分割的两个必要条件,图0-1示意地说明了电力系统分级管理的概况。国家网络

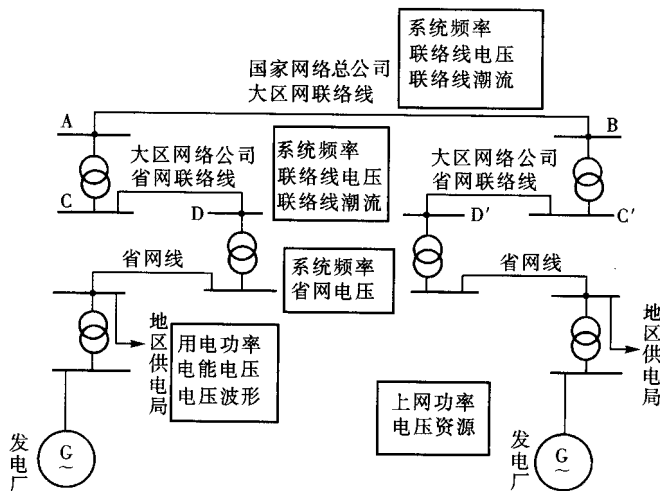


图0-1 电力系统分级管理示意图

总公司统一安排全国电能供需的总的平衡情况,根据与大区网络公司的协议方案,管理整个系统的频率稳定,以保证全系统的电能质量,并监察大区网络间联络线上的合同潮流与端点电压,实质上是对各大区网络公司执行有功平衡与无功平衡协议的情况,进行了最终的监察与管理。为了保证电力系统可靠、安全地连续供电,大区网络公司则应该监、管所属网线及省网间联络线上的协议潮流、电压,负责执行国家网络总公司分配的调频任务,以便根据全系统安全、高质量运行要求,分配给该大区网络的有功平衡与无功平衡协议得到完满的执

行。省网公司则应管好所属网线的电压与潮流，完成大区公司协议分配的调频任务。发电厂虽与各级网络公司没有资本的直接联系，但应根据电量竞价上网的原则，使协议规定的发电机按时上网，发送保证系统有功平衡所需要的电能，使全网的调频任务得以实现，并自动维持母线的运行电压，以确保全系统的电压资源。各级供电局则是直接面对广大用户用电需求的单位，应随时满足用户对电量的要求，使全系统的有功功率的平衡及调频任务具有坚实的基础，并保证满足电能质量在电压与波形方面的国家有关规定。

与上述分级管理任务并存的，是各级网络公司都设有相应调度机构，调度局是各级网络公司完成管理任务的技术执行机构，图 0-2 是国家调度总局通过各级调度局对电力系统进行统一调度的示意图。各调度局之间及其与发电厂、供电局之间的运行数据、信息的交换，均用虚线表示，国家调度总局通过 RTU (Remote Terminal Units) 从各大区调度局及国家级特大发电厂获取有关全系统运行状态的必要的实时信息，如枢纽变电站母线的矢量电压、重要线路的潮流等，对全网的安全状况进行分析，考虑是否要进行预防性调度，并可利用负荷的变化对全网重要机组的动态特性进行实行监测，还可对部分暂态稳定问题进行监视甚至进行紧急的直接调度处理，使系统化险为夷。“安全第一，预防为主”是各级调度局工作的指导原则，为了全系统整体的安全运行，顺应电力系统运行的特点，下级调度单位必须执行上级调度的安排与指令，向上级调度发送它要求的一切信息与数据，这是符合“统一调度，分级管理”的原则的。“统一调度”还可以进行必要的集中的继电保护的整定配合，及大范围的经济运行管理。本书的“调度自动化”部分的内容是直接为这一指导原则服务的，它包含调度局对所有收集的数据进行处理，提高其精确度，并对各级电网进行实时的安全分析与预防性调度等内容。

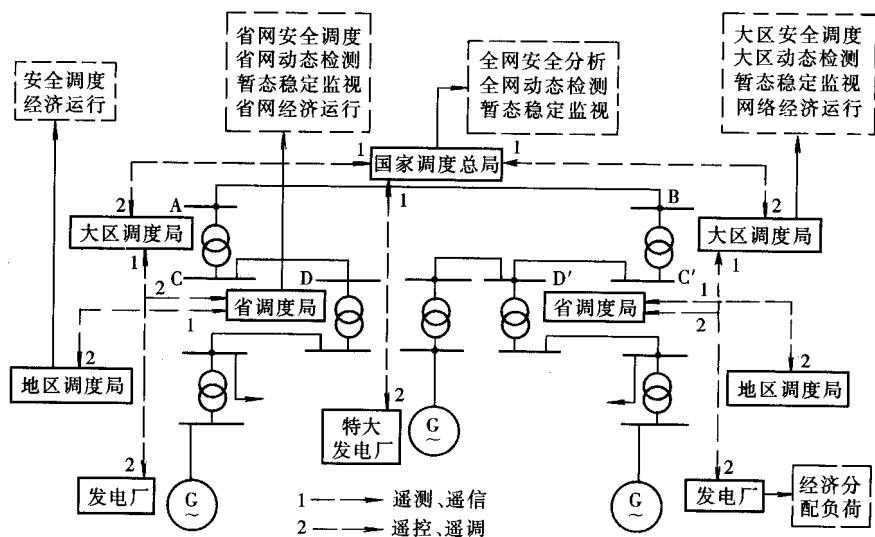


图 0-2 电力系统“统一调度、分级执行”示意图

电力系统的自动化系统与分层管理相仿，也可以理解成分层实现的复杂的自动控制系统，图 0-3 表示复杂自动化系统的分层控制示意图。第一层是直接控制器。直接控制器从被控制设备直接获取运行状态信息，按给定值或给定规律控制这些信息（可以是开环顺控的，但一般是指经反馈后闭环的），进而达到直接控制生产过程的目的。直接控制器是复杂



系统控制的基础设施，置于工作现场，其结构可靠、动作快速、效果直接而明显，是数量最多、应用普遍的一类自动装置。在复杂系统的自动控制方案中，只要条件许可，一般都尽量采用直接作用的控制装置。分层控制的第二层是监督功能层。它表示直接控制器还应具备对被控设备的监督功能，如越限报警、越限紧急停车、阻止越限运行及紧急启动等一般由设在直接控制器中的专门部件执行，整定值则是根据制造厂或上级技术管理机构规定的监督功能制定的。

第三层是寻优功能层。寻优功能指的是自寻稳态最优解的功能。稳态最优解一般在多个设备并行工作时出现，最优解的结果一般作为控制器的给定值。第四层是协调、安全调度等功能层。协调是指在全系统范围内的协调。复杂系统内的被控设备，根据其工作条件与要求，分别采用直接控制及监控与寻优的分层处理后，剩下的就是要根据全系统的整体利益进行协调与控制的功能，线索较为清晰。协调与控制的内容是由各级调度局发出的有关安全分析、预防调度等的指令，这些指令一般都可称为“二次调节”，使协调、安全调度等功能能够实时地进行。协调与安全调度的结果应该是寻优功能的依据。第五层为经营与管理层。它表示应把全系统的技术运行状态与经营依据，如市场、原料、人员及其素质、计划安排等进行综合分析，用以指导系统的协调功能，但因其属于管理范畴，本书未予涉及。

电力系统的自动化是结合了电力系统运行的特点，按照复杂系统控制的一般规律，分层实现的。实现电力系统自动化所需的电力系统方面的基础知识，在“电力系统”课程中讨论；所需的控制理论方面的基础知识，则在“自动控制理论”课程中讨论。本书是在这些知识的基础上，对电力系统自动化中典型控制设备的基本动作原理进行分析与讨论，以使读者对电力系统自动化及其基本问题有一个基础性的了解。

根据教学大纲的要求，本书共分八章。

第一章讲发电机上网的问题，称“同步并列的自动化”。这是将同步发电机一台台地投入系统进行并列运行，以组成电力系统的基本步骤，也是上网竞价的第一步。第二章讲电力系统的自动调压问题，既包括发电机的自动调节励磁系统，即发电机端电压的自动调整，也包括大用电户的端电压的稳定问题等。电力系统先要有电压资源，而无功功率又必须平衡，才能达到全系统的电压稳定运行，满足电能质量在这方面的要求。而我国电网运行规程又规定无功功率要力争做到“分层、分级、分区就地平衡”，所以自动电压调节属于图 0-3 的直接控制器的功能；而第一章的自动并列装置则是设有较多的监督功能的控制器，以避免越限并列。由于这两种自动化设备均装设在厂、站现场，动作时不需要其他设备的信息，一般称它们为电力系统常规自动装置。

第三章则是运用自动控制理论来分析同步发电机自动励磁调节的动态特性及其对电力系统动态稳定的影响。讨论的只是电力系统动态稳定中的一个局部性问题，但它能说明电力系统自动化对电力系统稳定运行的影响。

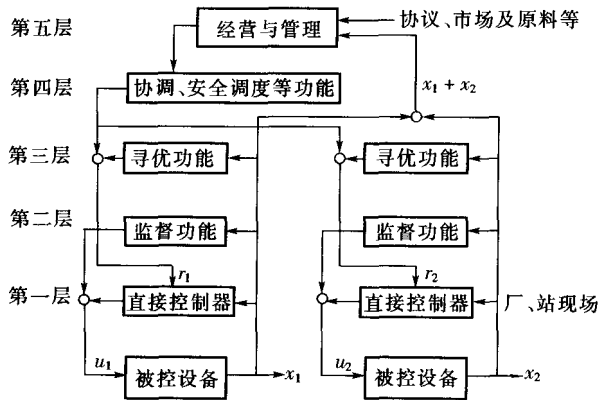


图 0-3 复杂自动化系统分层控制示意图

第四、五、六、七章均讲图 0-2 中调度局功能的自动化问题，统属于图 0-3 的第四层，这是计算机兴起后发展得最快的一个方面。调度功能，简单说来，可分为监视与控制两部分。图 0-3 表示的自动控制系统的寻优与协调等的基本原理，都属于调度自动化章节中的内容。第四章先对电力系统调度自动化的历史进程进行了回顾，说明了其控制系统的构成及基本任务，随之分别介绍了第五、六、七等三章的内容。

第八章讨论按频率自动减负荷装置的动作原理，这是一种较为典型的反事故自动装置，装设在部分变电站，但它的整定值则要经过全系统的协调确定，由于它的动作特点，本书仍将它视为常规自动装置，它至今仍是电力系统重要而有效的反事故措施。鉴于近年来世界性预防连环事故的经验，增加了对低电压减载的简述。

本书各章对厂、站、网三者应有的控制功能都结合典型的自动化设施进行了讨论，因而可以使读者对电力系统自动化有较为全面的基本了解。

## 第一章 同步发电机的自动准同期

### 第一节 概 述

#### 一、同步并列与准同期

电力系统是由多台发电机组与多条输电线路互连而成的。一般情况下,在一个电力系统中并列运行的各发电机转子都以相同的电角速度运转,转子间的相对角差不超过允许值,即处于同步运行状态。通常互不相连的两个系统是不同步的,一台未投入系统的发电机与系统也是不同步的。发电机投入系统参加并列运行的操作称为并列操作。同步发电机的并列操作称为同期,以近于同步运行的条件进行的并列操作,在我国一般称为准同期。所以并列是组成电力系统的第一项操作,“将一台发电机组用准同期的方式并入电厂母线”与“将电力系统的两部分用准同期的方式进行并列”可以说是两类问题,图1-1简要地说明了这两种情况。由于具体条件不同,它们的自动化技术也有较大的差别;如果一般地来讨论“电力系统并列操作的自动化”问题,显然涉及的面较广,内容也较为烦琐。因此,本书仅讨论同步发

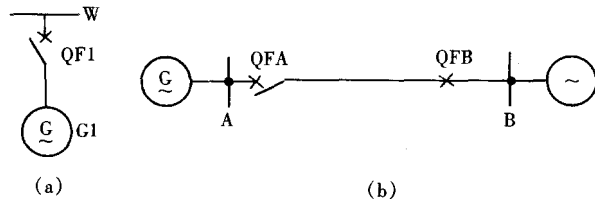


图 1-1 发电机并列示意图

(a) 发电机将与母线并列运行时; (b) 系统两部分要实现同步运行时

电机用准同期方法与厂母线进行并列的“并列操作自动化”问题,因为它是自动并列问题中最常见的;同时在技术上也最有典型性的问题。图1-1(a)表示发电机 G1 欲与母线 W 并列运行时,必须利用断路器 QF1 进行并列操作;图1-1(b)说明,当系统两部分要实现同步运行时,也必须利用断路器 QFA 进行并列操作。

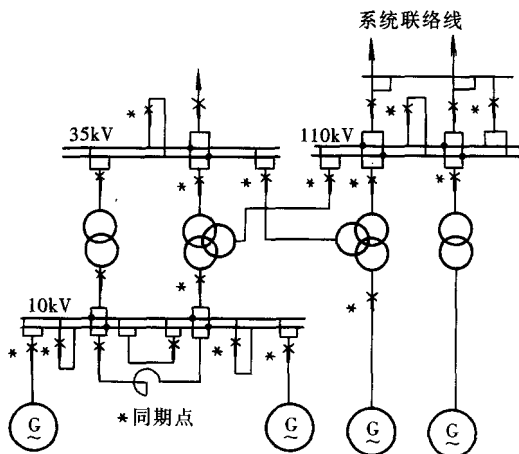


图 1-2 发电厂的同期点举例

在发电厂中,每一个有可能进行并列操作的断路器都是电厂的同期点。例如如图1-2中,每个发电机的断路器都是同期点,因为各发电机的并列操作,都在各自的断路器上进行。母线联络断路器也都是同期点,它对于同一母线上的所有发电单元都是后备同期点。当变压器检修完毕投入运行时,可以在变压器低压侧断路器上进行并列操作。三绕组变压器的三侧都有同期点,这是为了减少并列运行时可能出现的母线倒闸操作,保证迅速可靠地恢复供电。110kV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,也可利用旁路母线断路器进行并列操作;而母线分段断路器

一般不作为同期点,因为低压侧母线解列时,高压侧是连接的,没有设同期点的必要。

很显然,理想的同步并列的条件应为:

- (1) 待并发电机频率与母线频率相等,即滑差(频差)为零。
- (2) 断路器主触头闭合瞬间,待并发电机电压与母线电压间的瞬时相角差为零,即角差为零。
- (3) 待并发电机电压与母线电压的幅值相等,即压差为零。

当系统处于稳态运行时,图 1-1 (a) 的待并发电机 G1 如果实现了上述三个条件,虽然尚未并入系统,但可说已与系统处于“同步状态”,无论是自动或手动合上 QF1,都可以使 G1 平滑地与系统进行同步运行,不发生任何的并列冲击与振荡,这是典型的同步并列。本章讨论的自动准同期原理是在上述三个同步并列条件,即  $\Delta u \cong 0$ ,  $\Delta f \cong 0$  及  $\Delta \delta \cong 0$  的情况下。同步发电机的自动并列问题一般称作自动准同期。目前我国自动准同期装置应用较为普遍。在并列瞬间,如果发电机与母线间存在着电压差、频率差或相角差,其值超过允许值都会引起相应的冲击电流与振荡过程,通常自动准同期装置的控制效果很好,使得这些差值很小。一般都把图 1-1 (a) 的母线看成是无穷大母线, QF1 合上后,发电机的同步过程被看成是小扰动情况下的线性化系统的动态问题,发电机本身所固有的阻尼特性可使因并列产生的不大的振荡过程会很快消失,并与系统进入同步运行,因而分析并列时可能产生的冲击影响并加以限制,显得较为必要。随着大型机组的出现,材料耐受冲击的裕度逐步减小,而并列又是一种相对频繁的操作,从保护汽轮机组的机械强度与疲劳寿命着眼,冲击的烈度是应该严格加以限制的。对准同期并列时的压差、滑差、角差的限制,因机组大小而不同,世界各国的规定也各异,可以互作参考。

## 二、准同期条件的分析

准同期条件是指图 1-1 (a) 中, QF1 触点闭合前的瞬间,发电机 G1 与母线 W (视作无穷大) 间的滑差、角差与压差。它们对形成自动准同期的条件、捕捉并列的时机及可能产生的冲击等都有重要的影响,现分别分析如下。

### 1. 滑差

图 1-1 (a) 中, QF1 按准同期条件合上之前,待并发电机 G1 的电压  $\dot{U}_g$  及其频率  $f_g$  与发电厂母线电压  $\dot{U}_s$  及其频率  $f_s$  一般是不相等的。在并列过程中,两者的频率差是一项很重要的参数,用  $f_{s.s}$  表示。显然,可令

$$f_{s.s} = f_g - f_s$$

当两个交流电压的频率不等(但较接近)且具有公用接地点时,如图 1-3 (a) 所示,一般用两个有相对旋转速度的矢量来表示它们,见图 1-3 (b)。两个交流电压  $\dot{U}_g$ 、 $\dot{U}_s$  间的瞬时相角差  $\delta$  就是图中两矢量间的夹角;两电压矢量间的相对电角速度称为滑差角速

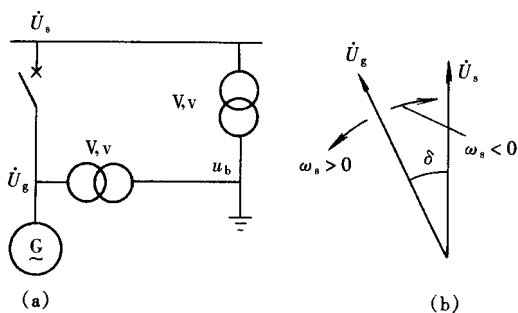


图 1-3 滑差电压原理图

(a) 电路示意图; (b) 矢量图

度(简称滑差),用  $\omega_s$  表示。于是得

$$\begin{aligned} \omega_s &= \frac{d\delta}{dt} = \frac{d(\varphi_g - \varphi_s)}{dt} \\ &= \frac{2\pi d(f_g t - f_s t)}{dt} = 2\pi(f_g - f_s) = 2\pi f_{s.s} \end{aligned}$$

式中  $\varphi_g$ 、 $\varphi_s$ ——分别为发电机交流电压瞬时相角与母线交流电压的瞬时相角。

很显然,  $\omega_s$  是有正、负值的, 其方向与所规定的参考矢量有关。图 1-3 (b) 中, 以系统电压  $\dot{U}_s$  为参考矢量, 于是  $f_g > f_s$  时,  $\omega_s > 0$ , 而  $f_g < f_s$  时,  $\omega_s < 0$ 。反之, 若以  $\dot{U}_g$  为参考矢量, 则  $\omega_s$  的方向恰好相反。

滑差也可以用标么值表示, 即

$$\omega_{s*} = \frac{2\pi f_{s.s}}{2\pi f_s} = \frac{f_{s.s}}{50}$$

$\omega_s$  的百分值为

$$\omega_s(\%) = 2f_{s.s}(\%)$$

滑差周期为

$$T_s = \frac{2\pi}{|\omega_s|} = \frac{1}{|f_{s.s}|}$$

滑差或滑差周期都可以用来确定地表示待并发电机与系统之间频率差的大小。滑差大, 则滑差周期短; 滑差小, 则滑差周期长。在有滑差的情况下, 将机组投入电网, 需经过一段加速或减速的过程, 才能使机组与系统在频率上“同步”。加速或减速力矩会对机组造成冲击。显然, 滑差越大, 并列时的冲击就越大, 因而应该严格限制并列时的滑差。我国在发电厂进行正常人工手动并列操作时, 一般限制滑差周期在 10~16s 之间。

## 2. 角差

如果并列断路器触头闭合的瞬间, 角差  $\delta$  恰好为零, 则前述同步并列的条件 (2) 完全得到满足, 因相角差而产生的并列冲击也为零。但是断路器是由机械构件组成的, 每次的闭合时间不可能完全一样, 只能按照断路器机构的平均闭合时间进行整定; 同时自动准同期装置也可能出现误差, 这使得发电机不能每次都在  $\delta=0$  瞬间并列。图 1-4 (c) 表示当  $\Delta f=0$ ,  $\Delta U=0$  时, 而只有同步并列的条件 (2) 不能满足时, 在并列断路器闭合前瞬间, 电机电压与母线电压间存在着相角差  $\delta$  的电压矢量图。图中的  $\Delta \dot{U}$  将对发电机产生冲击电流, 冲击电流的最大值为

$$i''_{ch, \max} = \frac{1.8\sqrt{2}\Delta U_s}{X_q''} \left( 2\sin \frac{\delta}{2} \right) \approx \frac{1.8\sqrt{2}\Delta U_s \sin \delta}{X_q''}$$

式中  $\Delta U_s$ ——系统电压的有效值;

$X_q''$ ——发电机 q 轴次暂态电抗, 其值与发电机 d 轴次暂态电抗  $X_d''$  相近。

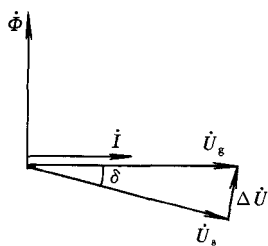


图 1-5 有功冲击电流矢量图

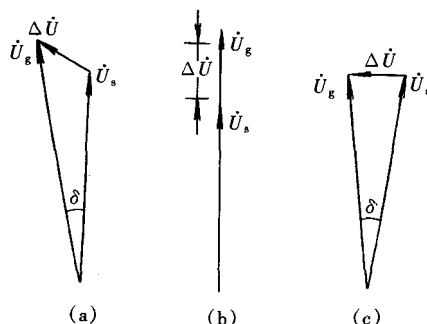


图 1-4 准同期条件的分析

(a) 合闸瞬间电压矢量图; (b) 仅有电压幅差的矢量图; (c) 仅有电压角差的矢量图

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

此时的冲击电流属有功冲击电流, 其矢量图见图 1-5。

图 1-4 (c) 中的  $\delta$  角一般称并列 (或合闸) 误差角, 它产生的有功冲击电流对汽轮机组的安全与寿命影响较大, 机组容量越大, 对  $\delta$  值的限制越严。另一方面断路器动作时间的误差等因素, 使并列允许滑差值与允许并列误差角间可能形成某种制约关系, 现举例说明如下。

【例 1-1】在图 1-1 (a) 表示的并列操作下, 为保证汽轮机发电机的安全与寿命, 一般规定不允许因角差产生的冲击电流值为发电机空载时突然发生机端短路的电流冲击值的  $\frac{1}{10}$ , 试求其最大允许并列误差角, 并讨论其与并列允许滑差值的关系。

解 由题可得

$$10 \frac{\sin \delta}{X_q''} = 10 \frac{\sin \delta}{X_d''} = \frac{1}{X_d''}$$

于是可得最大允许并列误差角为

$$\delta_{d, \max} \approx \sin \delta = 0.1(\text{rad}) = 5.73^\circ$$

最大并列误差相角是由断路器的合闸时间误差和自动准同期装置的整定值与动作值间的误差造成的, 它应不大于最大允许合闸相角, 即

$$\delta_{d, \max} = \omega_s \Delta t_{\max} = \omega_s (\Delta t_{\text{QF}, \max} + \Delta t_{z, \max})$$

式中  $\Delta t_{\max}$ ——合闸时间总误差的最大值;

$\Delta t_{\text{QF}, \max}$ ——断路器机构等造成的时间误差最大值;

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

在合闸时间的误差中, 断路器的弹簧、传动机构等造成的时间误差所占比重是较大的, 如果自动准同期装置的合闸时间误差远小于断路器合闸机构的时间误差, 则

$$\Delta t_{\max} \approx \Delta t_{\text{QF}, \max}$$

由此可以得出, 一般待并发电机并入电网时的最大允许滑差周期为

$$T_{y, \max} = \frac{2\pi}{\omega_{s, \max}} = \frac{2\pi \Delta t_{\max}}{\delta_{d, \max}}$$

对于一些重型少油断路器, 合闸时间较长, 其可能的  $\Delta t_{\max}$  也较大, 如取  $\Delta t_{\max}$  为 0.1s, 则得

$$T_{y, \max} = 6 \sim 7\text{s}$$

本例说明滑差周期长, 滑差小, 则同样的误差合闸时间所造成的并列误差角就小, 冲击也小, 所以并列时, 滑差不能过大。我国的运行经验是, 在发电机并入电网时, 滑差周期控制在 10s 左右较为合适。

[例 1-1] 也说明当要求并列滑差在一确定值附近时, 并列操作所使用的断路器要与  $\delta_{d, \max}$  相适应, 如现代巨型机组, 其安全裕度较小,  $\delta_{d, \max}$  只允许  $2^\circ$ , 很显然, 所用并列操作断路器的合闸时间也应减小, 即需使用快速断路器, 其  $\Delta t_{\max}$  也相应地较小, 使并列时的允许滑差维持在适于正常操作的范围之内。

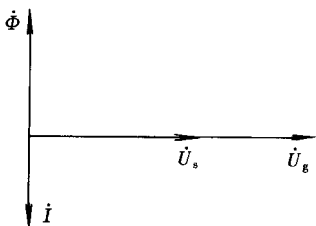


图 1-6 无功冲击电流矢量图

### 3. 压差

图 1-4 (b) 是只有同步并列的条件 (3) 得不到满足, 发电机电压幅值与母线电压幅值不相等时的情形, 即  $\Delta U \neq 0$ 。图 1-6 表示由  $\Delta U$  产生的将是无功冲击电流。冲击电流的最大值为

$$I_{\text{ch}, \max}'' = \frac{1.8\sqrt{2}(U_g - U_s)}{X_d''} = \frac{2.55\Delta U}{X_d''}$$

式中  $U_g$ 、 $U_s$ 、 $\Delta U$ ——相应电压的有效值。

$I_{\text{ch}, \max}''$  随机组容量等可以有不同的规定值。为了保证机组的安全, 我国曾规定压差并列冲击电流不允许超过空载时机端短路电流的  $1/12 \sim 1/10$ 。据此, 得准同期并列的一个条件为: 电

压差  $\Delta U$  不能超过额定电压的 5%~10%。现在一些巨型发电机组更规定  $\Delta U$  在额定电压的 0.1% 以下, 即希望尽量避免无功冲击电流。

当角差与压差同时存在时, 并列时断路器触头间的电压矢量如图 1-4 (a) 的  $\dot{\Delta U}$ , 分析它对发电机组产生的冲击效果时, 仍应将它分为有功冲击电流与无功冲击电流两部分, 分别加以对待, 如图 1-4 (b) 与 (c) 所示, 因为这两部分电流的冲击效果出现在机组的不同部位。

### 三、自动准同期装置的功能

我国专用于自动准同期的装置有两种: 微机同期装置与模拟式同期装置。它们一般都具有两种功能: 一是自动检查待并发电机与母线之间的压差及频差是否符合并列条件, 并在满足这两个条件时, 能自动地提前发出合闸脉冲, 使断路器主触头在  $\delta$  为零的瞬间闭合。二是当压差、频差不合格时, 能对待并发电机自动进行均压、均频, 以加快进行自动并列的过程, 但这一功能对联络线同期及多机共享的母线同期自动装置是不必要的。由于一般断路器的合闸机构为机械操动机构, 从合闸命令发出, 到断路器主触头闭合瞬间止, 要经历一段合闸时间 (此时间一般为 0.1~0.7s), 因而自动准同期装置在检查压差和频差已符合并列条件时, 还必须在角差  $\delta$  为零的时刻前, 发出合闸命令 (提前的时间等于断路器的合闸时间) 才能使断路器主触头闭合瞬间的相角差恰好为零, 这一时段称为“越前时间”。由于该越前时间只需按断路器的合闸时间进行整定, 与滑差及压差无关, 故称其为“恒定越前时间”。在发电机的自动准同期装置中, 恒定越前时间是它的关键部分。微机同期装置与模拟式同期装置在原理上虽基本相同, 但技术方案却相差很大, 下面将分别讨论它们。

## 第二节 数值角差、整步电压与越前时间

### 一、数值角差与越前时间

自动准同期装置在“恒定越前时间”瞬间发出进行并列命令的功能, 都可以利用数值角差的时程来实现。若并列时母线电压瞬时值为

$$u_s = U_{s.m} \sin(\omega_s t + \varphi_{s.0})$$

发电机电压瞬时值为

$$u_g = U_{g.m} \sin(\omega_g t + \varphi_{g.0})$$

式中  $U_{s.m}$ 、 $U_{g.m}$ ——相应电压的幅值;

$\omega_s$ 、 $\omega_g$ —— $\dot{U}_s$ 、 $\dot{U}_g$  的电角速度;

$\varphi_{s.0}$ 、 $\varphi_{g.0}$ ——相应电压的初相角。

母线电压瞬时值与发电机电压瞬时值之差为

$$u_d = u_s - u_g$$

图 1-7 为用矢量表示的滑差电压图。

在有滑差的情况下, 母线电压与发电机电压之间的相角  $\delta$  不为常数, 而是时间  $t$  的函数, 即

$$\delta(t) = \omega_s t + \varphi_{s.0} - \varphi_{g.0} = \omega_s t + \delta_0$$

随着  $t$  的进程,  $\delta$  从 0 到  $2\pi$  做周期性变化。微机自动准同期装置对  $\delta$  作了数值测量。其原理如下:

图 1-8 (a) 表示不同相的两正弦电压, 它们过零点

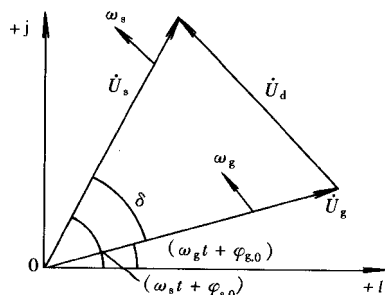


图 1-7 用矢量表示的滑差电压图

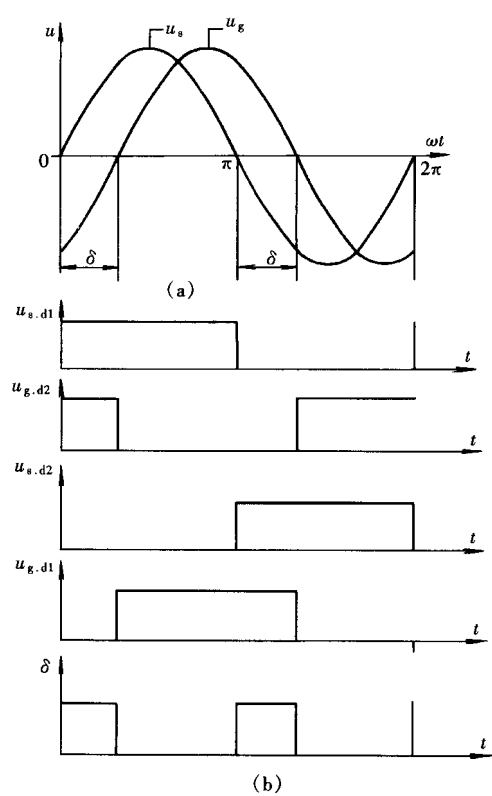


图 1-8 角差脉冲原理示意图  
(a) 正弦电压相角图; (b) 过零矩形波获取角差图

的相角差正是需要的  $\delta$ ，所以在微机自动准同期装置中一般都采用运算放大器的“过零电路”作为测量  $\delta$  的基础。图 1-9 (a) 是过零电路原理图，当两个同相的正弦电压分别加在两个运算放大器的入口端时，出口则为两个过正弦波零点的矩形波。图 1-9 (b) 是利用逻辑接法从两个矩形波以获取角差  $\delta$  的离散值的示意图，正半周的系统矩形波  $u_{s,d1}$  与经过反相的发电机矩形波  $u_{g,d2}$  接至同一个与门，而正半周的发电机矩形波  $u_{g,d1}$  与经过反相的系统矩形波  $u_{s,d2}$  接至另一个与门，它们都输入到同一个或门，这样就在一个正弦周期内，得到了两个  $\delta$  的采样值， $\delta$  的采样周期为 0.01s。图 1-8 (b) 说明了其逻辑部分的时间关系。

由图 1-7 知，当发电机与系统不同步时， $\delta$  就在 0 与  $2\pi$  之间周而复始的变化。图 1-10 是在一个滑差周期内  $\delta$  的时程图，恒定越前时间要求在某个  $\delta_i$  值时，即时发出并列合闸命令，使断路器触头闭合瞬间的  $\delta$  恰好为零。在控制理论上称这为对  $\delta$  值为零的预报。预报的  $\delta_i$  值的大小与滑差密切相关。滑差大，即  $\omega_s$  大，则  $\delta_i$  大；滑差小，则  $\delta_i$  小。有两种方法可以预报  $\delta_i$  值的大小，

一种可称为微分预报法，一种可称为积分预报法。现分别讨论如下。

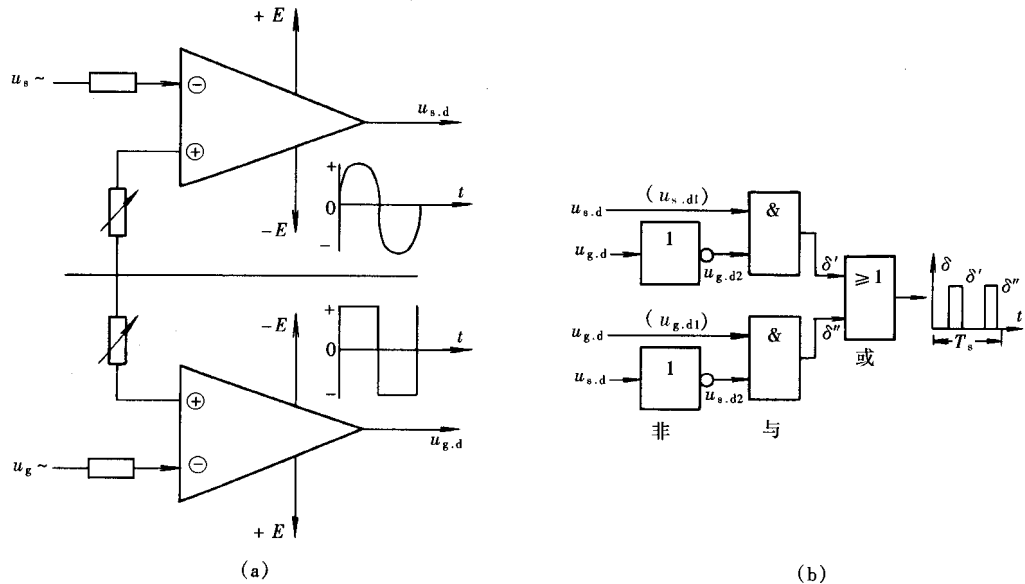


图 1-9 角差产生原理图  
(a) 电气部分; (b) 逻辑部分



(1) 微分预报法。设离散的  $\delta_i$  的变化是匀速的, 即匀速滑差, 如图 1-11 所示。其算法为

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{\delta_{i-1} - \delta_i}{\Delta t}$$

可以认为这就是此时  $\delta$  的变化速度。若令断路器的合闸时间为  $t_d$ , 考虑  $\delta_i$  值离散后的误差  $\varepsilon$ , 当

$$\delta_i = \frac{d\delta}{dt} t_d + \varepsilon \quad (1-1)$$

时发出合闸命令, 则触头闭合瞬间, 正好角差近于零。

但微分预报有一个固有的缺点, 即预报时段越长则误差越大。因为任何测量都是有干扰、有误差的, 如  $(\delta_{i-1} - \delta_i)$  的测量误差为  $\Delta\delta_{i.m}$ , 则预报的合闸命令的相角为

$$\delta_i + \Delta\delta_i = [(\delta_{i-1} - \delta_i)_0 + \Delta\delta_{i.m}] \frac{t_d}{\Delta t}$$

其误差为测量误差  $\Delta\delta_{i.m}$  的  $t_d/\Delta t$  倍, 对合闸时间较长的断路器是不大合适的, 当然更不适宜用于  $\delta$  有加速度的滑差情况。

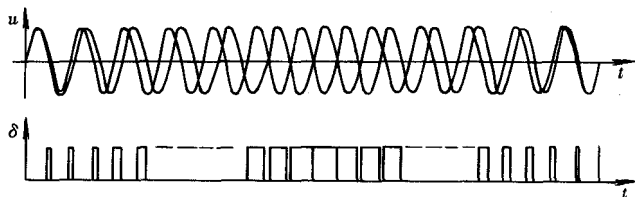


图 1-10  $\delta$  时程图

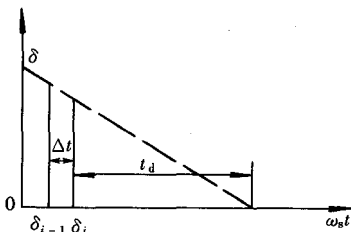


图 1-11 匀速滑差下的微分预报原理

(2) 积分预报法。利用微机具有存储及程序运行的功能, 采用积分预报的原理, 因而可大大减小噪声与预报的误差, 即使在加速度滑差或随机滑差的情况下, 也能获得较准确的越前时间。为节省篇幅起见, 仅以匀速滑差为例, 说明其工作原理如下。

根据断路器等条件, 现只讨论两步预报法。如图 1-12

(a) 所示, 从  $t_{i-1}$  到  $t_i$  为第一步, 步长  $T$  为

$$T = t_i - t_{i-k}$$

两步预报法为: 用从第一步中获得的有关  $\delta_i$  的信息, 预报两步后瞬间的  $\delta$  是否等于零。预报采取积分的方法, 即匀速滑差情况下, 有

$$\delta_{i+2k} = \delta_i + \int_i^{i+2k} \omega_s dt = \delta_i + 2\omega_s T$$

又有

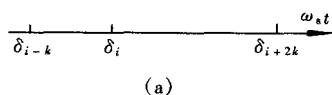
$$\delta_i = \delta_{i-k} + \omega_s T$$

于是得  $\delta_{i+2k} = \delta_i + \frac{\delta_i - \delta_{i-k}}{T} (2T) = 3\delta_i - 2\delta_{i-k}$

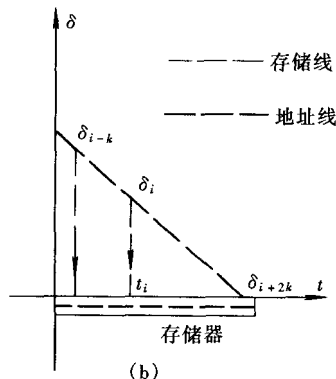
自动准同期的预报值为  $\delta_{i+2k} = 0$ , 于是得

$$\delta_i = \frac{2}{3} \delta_{i-k}$$

据此作出的微机自动准同期装置的恒定越前时间的工作原理如图 1-12 (b) 所示。将图 1-10 中的  $\delta_i$  脉冲系列按顺序存入各



(a)



(b)

图 1-12 积分存储预报原理图

(a) 两步预报法示意图; (b) 恒定越前时间的工作原理图