

普通高等教育



“十五”

PUTONG
GAODENG JIAOYU
SHIWU
GUIHUA JIAOCAI

规划教材

电力系统自动化 (第四版)

李先彬 主编



中国电力出版社

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



普通高等教育



“十五”

PUTONG

GAODENG JIAOYU

SHIWU

GUIHUA JIAOCAI

规划教材

电力系统自动化

(第四版)

主编 李先彬

编写 李先彬 张建华

赵冬梅

主审 樊俊



00081/06



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

1029958

内 容 提 要

本书是在第三轮教材《电力系统自动化》的基础上修订的,考虑了近十来年的技术进展及电力市场的试行经验。全书共分八章,专门阐述电力系统的自动调压、自动调频、自动减载、自动准同期及系统的实时状态估计、安全调度、动态监测及经济运行等的自动化原理及其自动装置、自动控制系统的工作特性等;另外,还附有必要的整定计算及例题。

本书为高等学校教材,也可供有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统自动化/李先彬主编. —4版. —北京:中国电力出版社, 2004

普通高等教育“十五”规划教材

ISBN 7-5083-2029-8

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(2004)第 052121 号

中国电力出版社出版、发行

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

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

1981 年 12 月第一版

2004 年 7 月第四版 2004 年 7 月北京第八次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17 75 印张 413 千字

印数 48551—52550 册 定价 28.00 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)

序

由中国电力教育协会组织的普通高等教育“十五”规划教材，经过各方的努力与协作，现在陆续出版发行了。这些教材既是有关高等院校教学改革成果的体现，也是各位专家教授丰富的教学经验的结晶。这些教材的出版，必将对培养和造就我国 21 世纪高级专门人才发挥十分重要的作用。

自 1978 年以来，原水利电力部、原能源部、原电力工业部相继规划了一至四轮统编教材，共计出版了各类教材 1000 余种。这些教材在改革开放以来的社会主义经济建设中，为深化教育教学改革，全面推进素质教育，为培养一批批优秀的专业人才，提供了重要保证。原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会在此间的教材建设工作中，发挥了极其重要的历史性作用。

特别需要指出的是，“九五”期间出版的很多高等学校教材，经过多年的教学实践检验，现在已经成为广泛使用的精品教材。这批教材的出版，对于高等教育教材建设起到了很好的指导和推动作用。同时，我们也应该看到，现用教材中有不少内容陈旧，未能反映当前科技发展的最新成果，不能满足按新的专业目录修订的教学计划和课程设置的需要，而且一些课程的教材可供选择的品种太少。此外，随着电力体制的改革和电力工业的快速发展，对于高级专门人才的需求格局和素质要求也发生了很大变化，新的学科门类也在不断发展。所有这些，都要求我们的高等教育教材建设必须与时俱进，开拓创新，要求我们尽快出版一批内容新、体系新、方法新、手段新，在内容质量上、出版质量上有突破的高水平教材。

根据教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的精神，“十五”期间普通高等教育教材建设的工作任务就是通过多层次的教材建设，逐步建立起多学科、多类型、多层次、多品种系列配套的教材体系。为此，中国电力教育协会在充分发挥各有关高校学科优势的基础上，组织制订了反映电力行业特点的“十五”教材规划。“十五”规划教材包括修订教材和新编教材。对于原能源部、电力工业部组织原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会编写出版的第一至四轮全国统编教材、“九五”国家重点教材和其他已出版的各类教材，根据教学需要进行修订。对于新编教材，要求体现电力及相关行业发展对人才素质的要求，反映相关专业科技发展的最新成就和教学内容、课程体系的改革成果，在教材内容和编写体系的选择上不仅要有本学科（专业）的特色，而且注意体现素质教育和创新能力与实践能力的培养，为学生知识、能力、素质协调发展创造条件。考虑到各校办学特色和培养目标不同，同一门课程可以有多种教材供选择使用。上述教材经中国电力教育协会电气工程学科教学委员会、能源动力工程学科教学委员会、电力经济管理学科教学委员会的有关专家评审，推

荐作为高等学校教材。

在“十五”教材规划的组织实施过程中，得到了教育部、国家经贸委、国家电力公司、中国电力企业联合会、有关高等院校和广大教师的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

教材建设是一项长期而艰巨的任务，不可能一蹴而就，需要不断完善。因此，在教材的使用过程中，请大家随时提出宝贵的意见和建议，以便今后修订或增补。（联系方式：100761 北京市宣武区白广路二条1号综合楼9层 中国电力教育协会教材建设办公室 010-63416222）

中国电力教育协会

2002年8月

前 言

本版是根据中国电力教育协会教协材办〔2002〕68号通知对本书的第三版进行修订的。由于第三版的修订是按照1991年高等学校电力工程类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2002年已历12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,本版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。

注有“*”的节仅供教学参考。

本版仍由李先彬同志主编,由张建华、赵冬梅两年轻同志参编,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主审。他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

2004年1月

第三版前言

本版是根据 1991 年在广州召开的高等学校电力工程专业教学委员会自动远动小组通过的修订大纲，在本书第一、二版基础上修订的，这次修订对原书内容作了较多的改动。

首先，为适应本课程，学时数由 80 减为 70 学时。本版在自动励磁调节器方面，只保留了晶体管式的调压器（第二章），将电磁元件的相复励调压器全章删去，其余各章也都有程度不同的删减。

其次，近几年来，我国在电网调度自动化方面，取得了长足的实质性进展，为此本版改写了“调度自动化引论”一章及“自动调频”的有关内容。在自动同期及自动调压器方面，国内都有一些基本性进展，本版也作了必要的简单介绍（附有“*”），供教学选用，以增强学生毕业后相应的工作能力。在分析自动调节励磁系统的有关动态特性时，本版摒弃了前两版沿用的同步发电机电力矩为角频率函数的概念，采用了“综合阻尼力矩系数”的定义，并与现有的稳定判据进行了对照。

本版的第二、八章由曲和南同志修订，第七章由黄孝涌修订，李先彬对全书进行了最后的修改与补充，张建华负责全书的校订工作。

华北电力学院商国才教授、安徽电力职工大学张惠忠同志对本书的修订工作提供了很多有益的意见，编者对他们表示由衷的感谢。

本书由华中理工大学樊俊教授主审，他不但对本书提出了很多宝贵的意见，且对本书的修订工作给予了令人难忘的关怀与鼓励，在此表示深深的谢意。

由于水平与条件所限，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

1993 年 10 月

目 录

序	
前言	
第三版前言	
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	10
第三节 自动准同期装置举例	18
第四节 微机电液调速器的自动准同期功能简介	30
第二章 电力系统电压的自动调节	32
第一节 电力系统运行电压的有关问题	32
第二节 同步发电机的励磁系统	42
第三节 励磁系统中转子磁场的建立与灭磁	48
第四节 电力系统自动调压器的概念与基本框图	57
第三章 自动励磁调节系统的动态特性与有关问题	89
第一节 概述	89
第二节 自动励磁调节系统的稳定性	91
第三节 线性化的同步发电机动态方程式	102
第四节 励磁调节对电力系统稳定的影响	110
第五节 励磁系统对暂态稳定的影响	124
* 第六节 综合阻尼力矩系数简介	126
第四章 电力系统调度自动化引论	130
第一节 电力系统调度的主要任务	130
第二节 电力系统的分区、分级调度管理	131
第三节 电力系统调度自动化控制系统的功能概述	133
第四节 电力系统调度自动化控制系统简介	135
第五节 电力系统调度自动化的主要内容	140
第五章 电力系统运行的状态估计	145
第一节 测量系统误差的随机性质	145
第二节 最小二乘法估计	149
第三节 电力系统运行状态的数学模型	156
第四节 电力系统最小二乘法状态估计	163
第五节 $P-Q$ 分解法的状态估计	172
第六节 电力系统运行状态估计框图	179

第六章 电力系统的安全调度与运行动态检测	185
第一节 导论	185
第二节 电力系统运行状态的安全分析	189
第三节 电力系统安全调度总框图简介	208
第四节 电力系统稳定性在线分析简介	210
* 第五节 自回归 AR (Autoregression) 随机过程 (Random Process) 简介	226
第七章 电力系统的自动调频与经济调度	228
第一节 概述	228
第二节 调频、电力市场与调频方程式	231
第三节 分区调频	239
第四节 电力系统调频负荷的经济分配	244
第五节 自动发电量控制 (AGC) 系统简介	249
第八章 电力系统低频自动减负荷	257
第一节 概述	257
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	261
第三节 UFLS 原理框图及有关问题	268
第四节 减负荷装置	270
参考文献	273

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,大者达千多公里,小的也有几百公里,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。

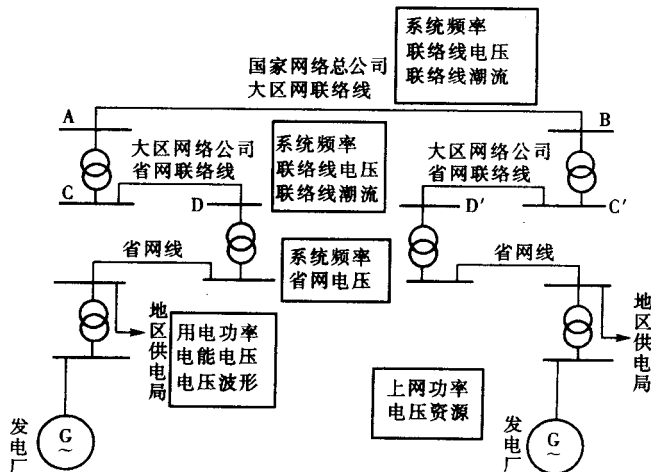


图 0-1 电力系统分级管理示意图

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;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。国家电网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,负责执行国网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

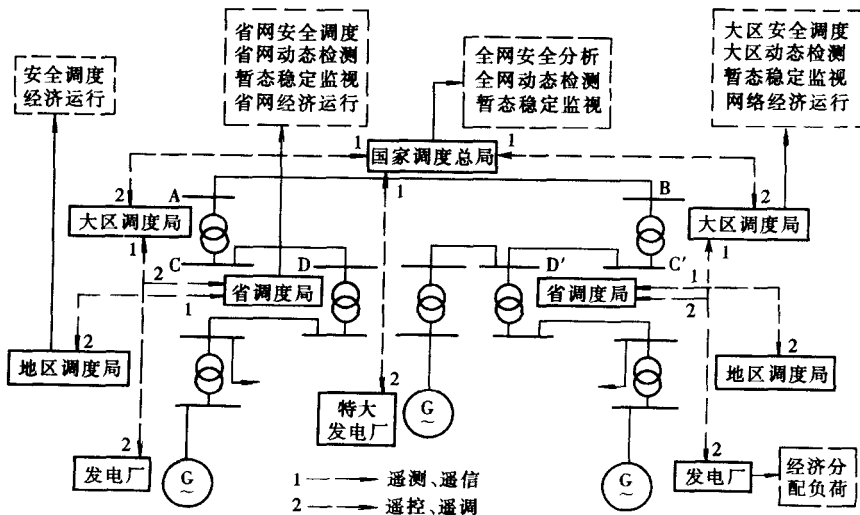


图0-2 电力系统“统一调度、分级执行”示意图

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。

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。图中的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

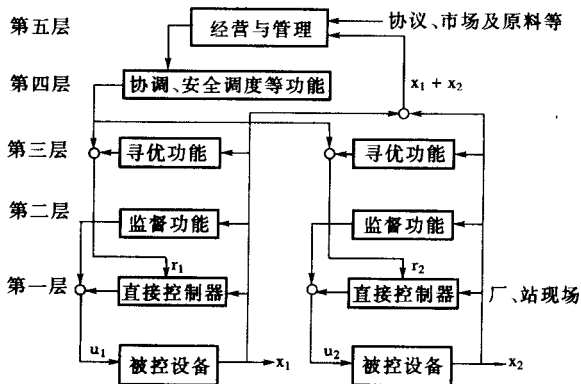


图 0-3 复杂自动化系统分层控制示意图

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。

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。

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

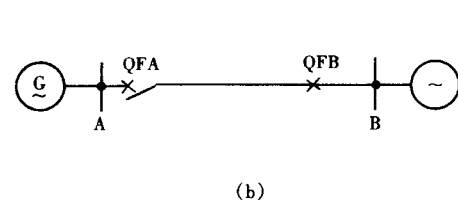


图 1-1 发电机并列示意图

要实现同步运行时，也必须利用断路器 QFA 进行并列操作。

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

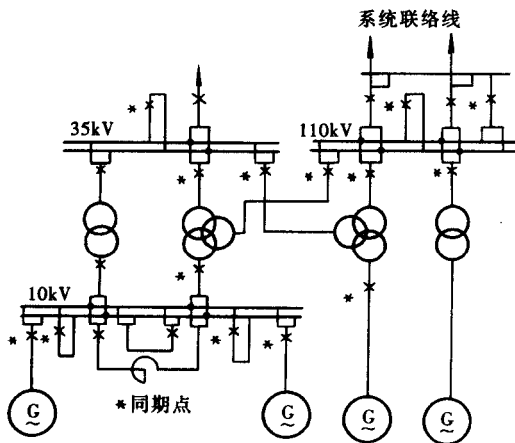


图 1-2 发电厂的同期点举例

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 $\Delta u \approx 0$, $\Delta f \approx 0$ 及 $\Delta \delta \approx 0$ 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,在我国目前还是一种必备的自动准同期装置,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,因而使得这些差值很小。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刺激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、频差、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触头闭合前的瞬间,发电机G1与母线W(视作无穷大)间的滑差、角差与电压差值。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 $f_{s.g}$ 表示。显然,可令

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

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 δ 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度(简称滑差),用 ω_s 表示。于是得

$$\omega_s = \frac{d\delta}{dt} = \frac{d(\varphi_g - \varphi_s)}{dt}$$

$$= \frac{2\pi d(f_g t - f_s t)}{dt} = 2\pi(f_g - f_s) = 2\pi f_{s.s}$$

式中 φ_g 、 φ_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, ω_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 ω_s 的方向恰好相反。

滑差也可以用标么值表示, 即

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

ω_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

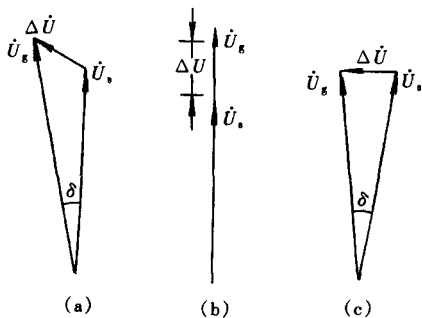


图 1-4 准同期条件的分析

如果并列断路器触头闭合的瞬间, 角差 δ 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 $\Delta f = 0$, $\dot{\Delta U} = 0$ 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 δ 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

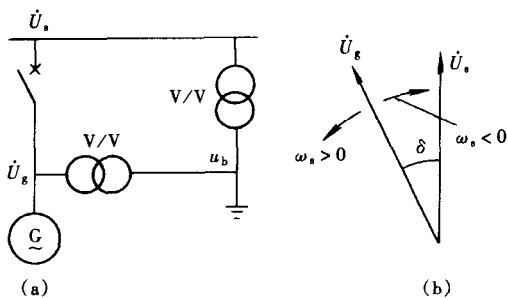


图 1-3 滑差电压原理图

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

式中 ΔU_s ——系统电压的有效值；

X''_q ——发电机 q 轴次暂态电抗，其值与 X''_d 相近；

X''_d ——发电机 d 轴次暂态电抗。

当 δ 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 δ 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 δ 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。

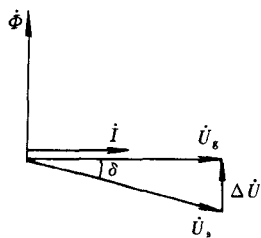


图 1-5 有功冲击电流矢量图

【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十分之一，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与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

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

式中 $\Delta t_{\max}$ ——合闸时间总误差的最大值；

$\Delta t_{QF, \max}$ ——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

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

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

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

对于一些重型贫油断路器，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