



高等学校教材

电力系统自动化

第三版

华北电力学院 李先彬 主编



1

高等学校教材

电力系统自动化

第三版

华北电力学院 李先彬 主编

中国电力出版社

内 容 简 介

本书是在第二轮教材《电力系统自动化》的基础上修订的。全书共八章,专门阐述电力系统中应用较为普遍的自动准同期、同步发电机的自动电压调整、电力系统的自动调频、自动减负荷、电力系统实时调度的状态估计、安全调度及经济运行等的自动化原理及其自动装置与自动控制系统的工作特性等。还附有必要的自动装置的整定计算公式与例题。

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.-3版.-北京:中国电力出版社,1995.11(1998重印)

高等学校教材

ISBN 7-80125-659-X

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(98)第03885号

中国电力出版社出版

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

梨园彩色印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

787×1092毫米 16开本 16.25印张 364千字

1981年12月第一版 1986年6月第二版

1995年11月第三版 1998年9月北京第六次印刷

印数41461—46550册 定价15.00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)

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类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

第 一 版 前 言

本书为“电力系统继电保护与自动化”专业“电力系统自动化”课程的教材，根据有关会议精神，本书还考虑到工程技术人员的需要，因此取材既着重反映国内在“电力系统自动化”方面的基本情况，又适当介绍国外在这方面的发展趋向与科研成果，同时还考虑学生毕业后在实际工作中对自动化技术方面的要求，书中附有“*”的内容为本课程的非基本部分，可供教学时选用。

本书共分九章。第一、二章由曲和南编写，第八、九章由黄孝涌编写，其余各章均由李先彬编写。李先彬任本书主编。全书由山东工学院刘从爱、王华云进行审阅。

在本书编写的具体工作中，得到各方面有关同志的大力支持与帮助，在此表示感谢。

本书中一定存在不少错误与缺点，望读者批评指正。

编 者

1981.5.29

第 二 版 前 言

本书是在第一轮教材《电力系统自动化原理与技术》的基础上，由华北电力学院李先彬副教授根据教学大纲的要求重新编写的。全书由华中工学院樊俊教授审阅。书中附有“*”的内容可作本课程的非基本部分，供教学时选用。

本书在编写工作中曾得到有关同志的支持与帮助，在此表示感谢。

本书尚有错误缺点，请读者批评指正。

编 者

1985. 5. 31

目 录

第三版前言	
第一版前言	
第二版前言	
绪论	1
第一章 同步发电机的自动准同期	4
第一节 概述	4
第二节 整步电压	9
第三节 自动准同期装置举例	14
第四节 微机自动准同期装置简介	24
第二章 同步发电机的自动调节励磁系统	27
第一节 同步发电机正常运行时的有关特性及 对自动调节励磁系统的要求	27
第二节 同步发电机的励磁机系统	33
第三节 励磁系统中转子磁场的建立与灭磁	39
第四节 自动调压器的概念与基本框图	48
第五节 可控硅全晶体管型自动调压器各环节的工作原理	49
第六节 晶体管自动励磁调节器举例 (ZTL-1 型)	59
第七节 励磁调节器静态特性的调整	65
*第八节 大功率晶体管开关式励磁调节器举例	68
第三章 自动调节励磁系统的动态特性与有关问题	73
第一节 概述	73
第二节 自动调节励磁系统的稳定性	75
第三节 线性化的同步发电机动态方程式	86
第四节 励磁调节对电力系统稳定的影响	94
第五节 励磁系统对暂态稳定的影响	106
*第六节 综合阻尼力矩系数简介	108
第四章 电力系统调度自动化引论	112
第一节 电力系统调度的主要任务	112
第二节 电力系统的分区、分级调度	113
第三节 电力系统调度自动化控制系统的功能概述	115
第四节 电力系统调度自动化控制系统简介	117
第五节 电力系统调度自动化的主要内容	122
第五章 电力系统运行方式的状态估计	127
第一节 测量系统误差的随机性质	127

第二节	最小二乘法估计	131
第三节	电力系统运行方式的数学模型	137
第四节	电力系统最小二乘法状态估计	144
第五节	$P-Q$ 分解法的状态估计	154
第六节	电力系统运行状态估计框图	161
第六章	电力系统的实时安全调度	167
第一节	导论	167
第二节	电力系统运行状态的安全分析	171
第三节	电力系统稳定性在线分析简介	190
第四节	提高电力系统调度安全水平的总框图	199
第七章	电力系统的自动调频与经济调度	205
第一节	概述	205
第二节	调频与调频方程式	208
第三节	分区调频	215
第四节	电力系统负荷的经济分配	220
第五节	优化潮流 (OPF)	225
第六节	自动发电量控制 (AGC) 系统简介	228
第八章	电力系统按频率自动减负荷	235
第一节	概述	235
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	239
第三节	“ZPJH”原理框图及有关问题	246
第四节	减负荷装置	248
参考书目		251

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、变电所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,除了发不敷求,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,为了保证电力系统可靠、安全地连续供电,电力系统都设有调度所,负责各厂、站间电能生产,(各

厂、站之间虽有功率的交流却并不需要信息的有效交换),电能传输的调度与管理(如图 0-1 虚线所示)。调度所与厂、所之间只有运行数据信息的交换,而没有功率的交流,是电力系统中的软环节。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。与其他复杂系统的自动控制相仿,电力系统的自动化也是分层实现的。

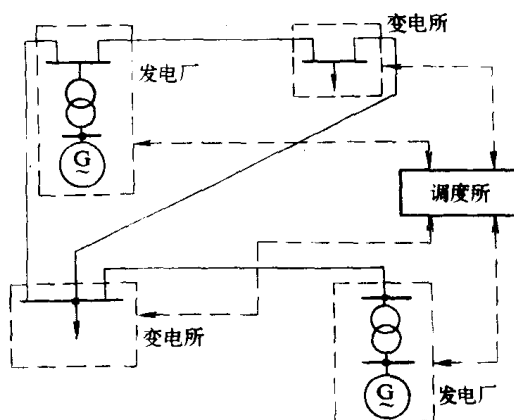


图 0-1 电力系统示意图

厂、站之间虽有功率的交流却并不需要信息的有效交换),电能传输的调度与管理(如图 0-1 虚线所示)。调度所与厂、所之间只有运行数据信息的交换,而没有功率的交流,是电力系统中的软环节。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。与其他复杂系统的自动控制相仿,电力系统的自动化也是分层实现的。

图 0-2 表示复杂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,并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,其结构可靠,动作快速,效果直接且明显,是数量最多,普遍应用的一类自动装置。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,包括越限报警、越限紧急停车、阻止越限运行,及紧急启动等。监督功能一般由设在直接控制器中的专门部件执行,其整定值则根据制造厂或上级技术管理机构的规定来确定。第三层是寻优功能层。寻优功能指的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。第四层是协调功能层。协

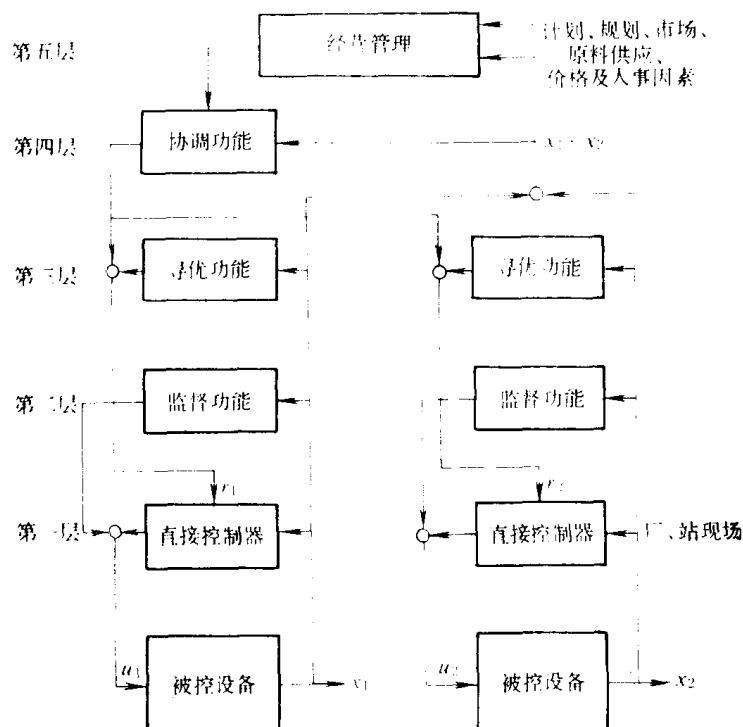


图 0-2 多层控制示意图

调是指在全系统范围内的协调。复杂系统内的应控设备，根据其工作条件与要求，分别采用直接控制及监督与寻优的分层处理后，剩下的就是要在全系统内进行协调处理的内容，线索较为清晰，需要协调的内容也大为减小，使协调功能能够实时地进行，协调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，并表示它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。

第一章讲发电机同步并列的自动化原理。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。第二章讲同步发电机的自动调节励磁系统，主要讲发电机端电压的自动调整。根据电力系统运行的特点，无功功率必需平衡才能达到电压稳定，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 0-2 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 0-1 中调度所功能的自动化问题，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，本书只着重讨论了控制作用的部分。图 0-2 表示的自动控制系统的寻优与协调的基本原理，都属于调度自动化章节中的内容。第四章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

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,转子间的相对电角度不超过允许值,此种运行方式称为发电机的同步运行。通常一台未投入系统参加并列运行的发电机与系统是不同步的。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,以等于或近于同步运行的条件进行的并列操作,在我国原称同步并列,现在一般称为准同期。除准同期外,也可采用自同期的并列方式。当采用准同期方式时,待并发电机应先励磁,然后按准同期的条件,通过并列操作,使发电机并入系统;采用自同期方式时,待并发电机并入系统后方给其转子励磁。

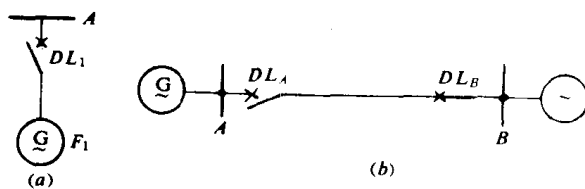


图 1-1 发电机并列示意图

并列操作是电力系统运行中的一项重要操作,不但正常运行时需要它,在事故处理中有时也需要通过它来迅速恢复整个系统的安全供电;不但在发电厂中需要它,在电力系统也需要它。图 1-1 说明需要进行并列操作的两种基本情况。图 1-1 (a) 表示发电机 F_1 欲与母

线 A 并列运行时,必须利用断路器 DL_1 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 DL_A 进行并列操作。

“将发电厂的一个机组用准同期的方式并入母线”与“将电力系统的两部分用准同期的方式进行并列”可以说是两个问题。由于具体条件不同,它们的自动化方案也有较大的差别;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。

在发电厂中,每一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。母线联络开关也都是同期点,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,没有同期要求。

很显然,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)相等。

(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 F_1 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

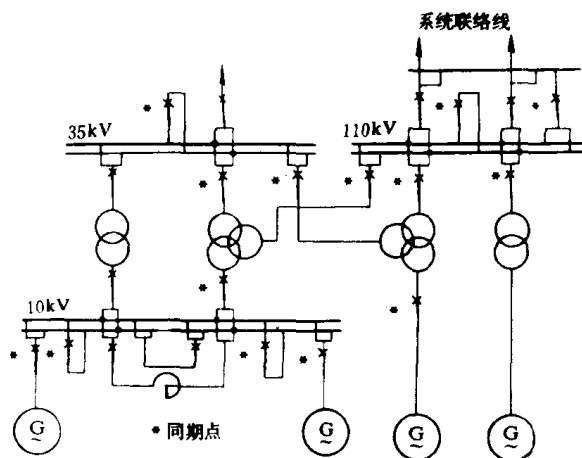


图 1-2 发电厂的同期点举例

手动合上 DL_1 , 都可以使 F_1 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。目前,在装有电液调速器的巨型汽轮与水轮发电机组上,利用调速器的连续调节作用,即可实现对系统频率与相角的“同步”,并持续一定时间,足以实现手动或自动的同步并列操作。由上也可看出,这种并列的特点是依赖对调速器的连续准确控制,它一般作为电液调速器控制部分的一个部件,实现调速与同期的一体化,目前运用尚不够普遍。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,它适用于用脉冲宽度控制的调速器系统,在我国目前应用较为普遍。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, DL_1 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,而并列又是一个相对频繁的操作,从保护汽轮机组的机械强度与疲劳寿命着眼,频繁的反复的冲击强度是应该加以严格限制的。对准同期并列时的压差、频差、角差的限制可以因机组大小而不同,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, DL_1 触头闭合前瞬间,发电机 F_1 与母线 A (视作无穷大) 间的滑差、角差与压差值,它们对自动准同期条件的形成,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, DL_1 按准同期条件合上之前,待并发电机 F_1 的电压 U_f 及其频率 f_f 与发电厂母线电压 U_x 及其频率 f_x 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 表示。显然,可令

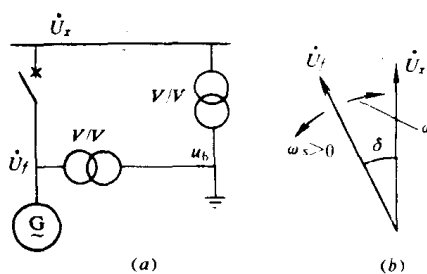


图 1-3 滑差电压原理图

$$f_s = f_f - f_x$$

当两个交流电压的频率不等(但较接近),而具有公用接地点时,如图 1-3 (a) 所示,一般可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 $\dot{U}_f$ 、 $\dot{U}_x$ 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旋转电角速度称为滑差角速度(简称滑差),用 ω_s 表示。于是得

$$\begin{aligned}\omega_s &= \frac{d\delta}{dt} = \frac{d(\varphi_f - \varphi_x)}{dt} \\ &= \frac{2\pi d(f_f t - f_x t)}{dt} = 2\pi(f_f - f_x) = 2\pi f_s\end{aligned}$$

式中 φ_f 与 φ_x ——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 $\dot{U}_x$ 为参考矢量,于是 $f_f > f_x$ 时, $\omega_s > 0$, 当 $f_f < f_x$ 时, $\omega_s < 0$ 。反之若以 $\dot{U}_f$ 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

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

ω_s 的百分值为

$$\omega_s (\%) = \frac{f_s}{50} \times 100 (\%)$$

滑差周期为

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

滑差 ω_s 的大小或滑差周期 T_s 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允许滑差。我国在发电厂进行正常人工手动并列操作时,一般取滑差周期在 10~16s 之间。

2. 角差

当使用很小的滑差进行并列时,图 1-3 (b) 的发电机电压 $\dot{U}_f$ 与系统电压 $\dot{U}_x$ 间有一很慢的相对旋转关系,在每一滑差周期内, $\dot{U}_f$ 与 $\dot{U}_x$ 间的相角差 δ 都有一瞬间为零。如果并列开关触头闭合的瞬间,恰好 δ 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。但是开关是由机械构件组成的,每次的闭合时间不可

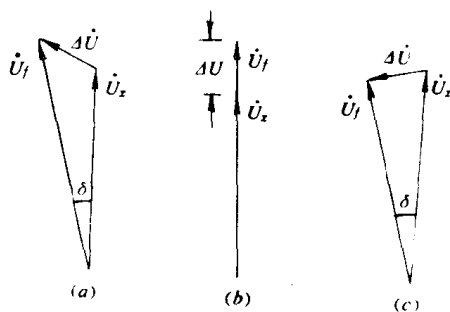


图 1-4 准同期条件的分析

能完全一样，同时自动准同期装置也可能出现误差，只能按照开关机构的平均闭合时间进行整定，这就使得发电机不能每次都在 $\delta=0$ 瞬间并列，图 1-4 (c) 表示当 $\Delta f=0$ ， $|\Delta u|=0$ ，而只有同步并列的条件 (2) 不能满足时，在并列开关闭合前瞬间，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

$$i''_{ch, \max} = \frac{2.55 \times U_x}{x''_q} 2 \sin \frac{\delta}{2}$$

式中 U_x ——系统电压的有效值；

x''_q ——发电机 q 轴次暂态电抗；

x''_d ——发电机 d 轴次暂态电抗。

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

$$i''_{ch, \max} = \frac{2.55 U_x \sin \delta}{x''_q}$$

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。另一方面开关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。

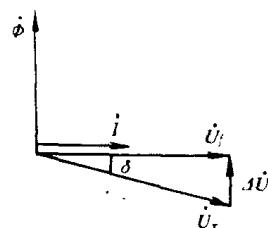


图 1-5 有功冲击电流矢量图

例 1-1 在图 1-1 (a) 表示的并列操作下，为保证发电机对于汽轮发电机， x''_d 与 x''_q 相近的安全运行，设允许因角差而产生的电流冲击值为发电机空载突然机端短路时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

$$\frac{10 \sin \delta}{x''_q} = \frac{10 \sin \delta}{x''_d} = \frac{1}{x''_d}$$

于是可得最大允许并列误差角为

$$\begin{aligned} \delta_{y, \max} &= \sin \delta \\ &= 0.1 \text{ rad} \\ &= 5.73^\circ \end{aligned}$$

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

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

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

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

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为

$$T_{s \cdot \min} = \frac{2\pi}{\omega_{s \cdot \max}} = \frac{2\pi \Delta t_{\max}}{\delta_{ch \cdot \max}}$$

对于一些重型贫油开关,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

$$T_{s \cdot \min} = 6 \sim 7s$$

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。

本例也说明当要求并列滑差在一确定值附近时,并列操作所使用的开关要与 $\delta_{ch \cdot \max}$ 相适应,如现代巨型机组,其安全裕度较小, $\delta_{ch \cdot \max}$ 只允许 2° , 很显然,所用并列操作开关的合闸时间也应减小,即需使用快速开关,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。

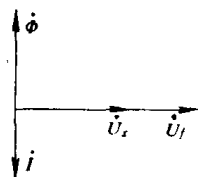


图 1-6 无功冲击电流矢量图

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 $|\dot{\Delta U}| \neq 0$ 。图 1-6 表示由 ΔU 产生的将是无功冲击电流。冲击电流的最大值为

$$i''_{ch \cdot \max} = \frac{1.8 \times \sqrt{2} (U_f - U_x)}{x''_d} = \frac{2.55 \Delta U}{x''_d}$$

式中 U_f 、 U_x 、 ΔU ——相应电压的有效值。

$i''_{ch \cdot \max}$ 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机端短路电流的二十分之一到十分之一。据此,由式 (1-1) 得准同期并列的一个条件为:电压差 ΔU 不能超过额定电压的 5~10%。现在一些巨型发电机组更规定在 0.1% 以下^[21],即希望尽量避免无功冲击电流。

当角差与压差同时存在时,并列时开关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

自动准同期装置一般具有两种功能: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 δ 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。

由于一般断路器的合闸机构为机械操作机构,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(此时间一般约为 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,还必须比角差 δ 为零这一时刻提前一段时间发出合闸命令(提前的时间等于断路器合闸时间),才能使断路器主触头闭合时的相角差恰好为零,这一段时间一般称为“越前时间”,由于该越前时间只需按断路器合闸时间进行整定,整定值应与滑差及压差无关,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,其工作原理将在后面讨论。

第二节 整 步 电 压

一、线性整步电压

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,可以利用线性整步电压来实现。若并列时母线电压瞬时值为

$$u_x = U_{xm} \sin(\omega_x t + \varphi_{ox})$$

发电机电压瞬时值为

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

式中 U_{xm} 、 U_{fm} ——相应电压的幅值;

ω_x 、 ω_f —— $\dot{U}_x$ 、 $\dot{U}_f$ 的电角速度;

φ_{ox} 、 φ_{of} ——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(即压差)为

$$u_s = u_f - u_x$$

图 1-7 为其矢量图。

在滑差存在的情况下,母线电压与发电机电压之间的相角差 δ 不为常数,而是时间 t 的函数,即 $\delta(t) = \omega_s t + (\varphi_{of} - \varphi_{ox}) = \omega_s t + \delta_0$,随着 t 的变化, δ 从 0 到 2π 做周期性变化。线性整步电压是指其幅值在一周期内与角差 δ 分段按比例变化的电压。在自动准同期装置中采用的线性整步电压,一般呈三角形波形,如图 1-8。图 1-8 (a) 表示相角差 δ 由 0~ 2π 变化时,线性整步电压的波形,其特点如下。

当 δ 在 0~ π 区间时,线性整步电压 u_{zb} 与相角差 δ 成正比,即 $u_{zb} = K\delta$ 其中 K 为比例常数,线性整步电压的大小随 δ 的增加而增大;当 $\delta = 0$ 时,线性整步电压有最小值,其值为零;当 $\delta = \pi$ 时,线性整步电压有最大值,其值为 $K\pi$,是常数。当 δ 在 $\pi \sim 2\pi$ 区间时,线性整步电压仍与相角差 δ 成正比,即 $u_{zb} = K(2\pi - \delta)$,此时线性整步电压的大小随 δ 的增加而成比例地减少,到 $\delta = 2\pi$ 时,又达到最小值, $u_{zb} = 0$ 。因此,线性整步电压幅值的大小与相角差 δ 之间是线性关系,而与同期电压 $\dot{U}_x$ 、 $\dot{U}_f$ 的幅值无关。

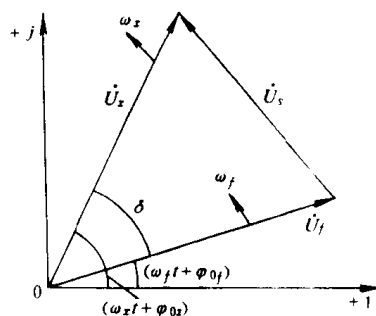


图 1-8 (b) 将线性整步电压的角度横坐标 δ 改为时间 图 1-7 用矢量表示的滑差电压图