

高等学校教材
专科适用

水电站自动化

浙江水利水电高等专科学校 楼永仁
南昌水利水电高等专科学校 黄声先 合编
武汉水利电力大学 李植鑫



高等学校教材

————— 专 科 适 用 —————

水电站自动化

浙江水利水电高等专科学校 楼永仁
南昌水利水电高等专科学校 黄声先 合编
武汉水利电力大学 李植鑫

中国水利水电出版社

内 容 提 要

本书专门阐述水电站自动化的原理和技术。内容包括：水轮发电机自动并列原理、方法和具体线路；快速相复励和可控硅励磁装置及其种种改进线路；水轮发电机组及辅助设备的自动控制；弱电集控的原理和方法；计算机在水电站中的应用，用单片机控制自动同期，自动调节励磁，以及微机程序控制机组操作的原理和方法等。

本书为高等专科学校“水电站动力工程”和“电力工程”专业的教材，也可供有关专业的教学参考和工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

水电站自动化/楼永仁，黄声先，李植鑫编. —北京：
中国水利水电出版社，2002 (2007 重印)
高等学校教材. 专科适用
ISBN 978-7-80124-690-5

I. 水… II. ①楼…②黄…③李… III. 水力发电站—自
动化技术—高等学校—教材 IV. TV736

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 023315 号

高等学校教材

专 科 适 用

水 电 站 自 动 化

浙江水利水电高等专科学校 楼永仁

南昌水利水电高等专科学校 黄声先 合编

武汉水利电力大学 李植鑫

*

中国水利水电出版社 出版
(原水利电力出版社)

(北京市三里河路 6 号 100044)

北京科水图书销售中心 (零售)

电话: (010) 88383994、63202643

全国各地新华书店和相关出版物销售网点经售

北京市兴怀印刷厂印刷

*

787mm×1092mm 16 开本 17 印张 386 千字 1 插页

1995 年 10 月第 1 版 2007 年 3 月第 4 次印刷

印数 7321—9320 册

ISBN 978-7-80124-690-5

(原 ISBN 7-120-02225-3 TV·885)

定价 23.80 元

前 言

本书是根据1990~1995年高等学校水利水电类专业专科教材选题和编审出版规划,作为高等专科学校电力工程和水电站动力设备装置两专业《水电站自动化》必修课而编写的,内容着重于中小型水电站自动化。基于国内中型以上水电站基本上实现了单机自动化,过去的有功功率和无功功率成组调节等自动装置真正投入运行的较少,而且在水电站采用计算机后,其功能也可由计算机统一处理,所以全书除绪论外,第1~4章主要介绍水电站单机自动化的有关内容,第5章介绍计算机在水电站中的应用。针对提高我国数量众多的中小型水电站自动化水平的艰巨任务,及诸如励磁系统的自动调节、计算机技术应用等的不断推陈出新,本书内容在考虑联系中小型电站实际线路的情况下,主要介绍基本原理和方法。本书既可作为高等专科学校有关专业的教材,也可作为省地设计和管理部门、机电安装和电站运行人员的专业参考。

微机原理是计算机在水电站自动化中应用的基础课和选修课程。不过,对尚无计算机软硬件知识的读者,也能学懂和掌握,并可从中得到应用计算机实现水电站自动化的启示,这也是本书的期望之一。

本书绪论、第一章、第二章由浙江水利水电高等专科学校楼永仁编写;第三章、第四章由南昌水利水电高等专科学校黄声先编写;第五章由武汉水利电力大学李植鑫编写;全书由楼永仁负责修改定稿。本书由华中理工大学王定一教授主审,进行了全面而详细的审核,提出许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

限于水平和条件,书中一定存在缺点和错误,敬希读者指正。

编 者

1992年元月

目 录

前 言	
绪 论	1
第一章 同步发电机的自动并列	5
第一节 同期的基本概念、方式和自动并列的意义	5
第二节 自动准同期	6
第三节 ZZQ-3A型自动准同期装置	10
第四节 采用自动准同期装置的同期系统接线	23
第五节 自动自同期并列	25
复习思考题	34
第二章 水轮发电机励磁的自动调节	36
第一节 自动调节励磁装置的作用和要求	36
第二节 水轮发电机的励磁方式和自动励磁调节装置的类型	40
第三节 复励和快速相复励	44
第四节 可控硅静止励磁装置的基本电路	64
第五节 中小型水轮发电机可控硅静止励磁装置	97
复习思考题	109
第三章 水电站辅助设备的自动控制	111
第一节 控制系统中的自动化元件	111
第二节 辅助设备的液位控制系统	125
第三节 辅助设备的压力控制系统	131
第四节 主阀和快速闸门的自动控制系统	138
复习思考题	150
第四章 水轮发电机组的自动控制	152
第一节 概述	152
第二节 机组附属设备的自动控制	159
第三节 机组操作的自动程序控制	165
第四节 机组操作的弱电选线控制	185
复习思考题	197
第五章 计算机在水电站自动化中的应用	199
第一节 水电站自动化计算机应用概况	199
第二节 水电站计算机控制系统概述	200
第三节 计算机自动控制系统过程通道	209
第四节 微机自动准同期	224

第五节 微机水轮机调速器	231
第六节 微机发电机励磁调节器	240
第七节 微机单元自动控制装置	249
第八节 微型计算机控制系统抗干扰措施	258
复习思考题	264
参考文献	266

绪 论

我国蕴藏着可开发的水力资源极其丰富，其中不少是分散在辽阔的中、小河流上。这正便于地方依靠自己的力量，以较少的投资、较短的时间，兴办中、小型水电站，就近供应当地工农业生产和生活发展所迫切需要的电力。电能的生产、传输、分配、消费是一个连续的过程，具有发、供、用同时完成的特点。电力系统内有功功率不足或剩余时，将引起系统频率的降低或升高；电力系统内无功功率盈缺，将造成系统电压升高或降低。单个发电机组（或水电站）孤立供电系统电能的质量及电力生产的安全性和经济性主要由机组或电站本身的保护和自动装置及远方控制、手动操作来保证。

实际上，几乎所有水电站都联网运行，而且，以中小水电为主的地方电网正由35kV向110kV发展，不少地方电网已与大电网相联形成复杂的电力系统。发电厂联网后，这时除水、火电厂本身的安全性和经济性外，又有多个电厂间互相影响的安全性和经济性，问题就趋复杂。

随着电力系统的不断扩大，系统的结构和运行方式也越来越复杂而多变，提高供电质量（电压和频率）和电力系统运行的经济性和可靠性是电力系统发展的突出问题。

一、水电站自动化的内容

水电站自动化是电力系统自动化的组成部分。目的是提高发电与供电的可靠性，保证电能质量，及电力系统经济、安全运行，同时也有效地改善运行人员的劳动条件。水电站的生产过程比火电站简单得多，机组能在较短的时间内起动且并入系统，容易实现机组本身的自动化，所以适于担任系统调峰、调频及事故备用的任务。我国所建造的中型以上的水电站，基本都能做到在中央控制室集中操作的自动化，在这些电站中，自动化的具体内容大致如下。

（1）由一个命令脉冲使机组起动并自动并入系统、停机、发电机转为调相机运行或相反的操作，都能按顺序自动完成。

（2）转速的自动调节，改变调速器的整定值，控制机组的有功出力。

（3）自动调节发电机的励磁，改变自动调节励磁装置的整定值，控制发电机的无功出力。

（4）当调速系统油压装置内油压有不正常的下降时，用自动投入备用油泵的方法来保持油压在一定的范围。

（5）当出现诸如发电机轴承或油槽的油温升高、油槽及油压装置的油面不正常、冷却水中断、设备过负荷等不正常情况时，发出警报信号。

（6）当出现诸如推力轴承及导轴承过热超过允许值、水轮机轴承失去润滑油、油压装置中油压发生事故性下降、机组过速、发电机短路等故障时，机组紧急停机，并自系统切除。

(1)~(6) 是构成机组本身自动化即单机自动化的基本内容。

(7) 由中央控制室来现场遥控高压开关的倒闸作业及发电机自动灭磁装置和电压调整设备的操作。

(8) 压缩空气系统、集水井排水泵等全厂共用设备的自启动和停止。

(9) 控制水工建筑物的工作闸门, 将遥控的闸门开度连续传送(测量)到电站的控制室去, 有时用闸门的极限位置和中间位置的信号来代替; 从水电站控制室来测量上下游水位; 在控制室发出上下游最高及最低水位的警报。

(10) 用自动监视厂用电主电源及备用电源母线电压的方式, 当厂用电事故切除后, 备用电源自动投入。

(11) 根据电站的具体情况, 决定在输电线路装设自动重合闸或自同期重合闸装置。

以上都是水电站基础自动化的内容。在大中型电站还采用了自动巡回检测来代替人工抄表。早期还在部分水电站设计试制了自动调频、有功功率成组调整等装置。

自从电子计算机开始在水电站应用, 水电站自动化发生了质的变革。电子计算机首先用于数据采集和处理, 并兼做一些智能控制, 完成检测、记录数据、报警、屏幕显示、打印制表。用计算机取代原频率与功率成组调整装置, 使机组间功率经济分配可计入更多的运行制约条件, 并提高其运行的灵活性。计算机用于水电站的经济运行和控制, 以及采用微机(单片机)构成调速装置、励磁调节装置、同期装置的研究和试验, 正逐渐进入实用阶段。

二、水电站自动化的意义

分析水电站的自动化, 有如下主要作用。

(1) 提高设备工作的可靠性和增加操作速度。水电站的大部分操作由自动装置进行(如开、停机操作和并网), 大大减少了运行人员误操作的可能性。自动装置能准确迅速地反映设备在工作时运行情况的变化, 及时地检测和报警。事故时, 能自动紧急停机, 还可以投入备用机组或设备, 使设备工作非常可靠, 从而提高了供电的可靠性。

由于自动化操作过程是在预先规定的顺序下, 不间断地进行着的, 操作的速度比人工操作要快得多。一台中等容量的水轮发电机从停机状态起动到投入电网, 用手动操作约需10~12min, 采用自动操作, 通常只需1min。

(2) 保证电能质量和稳定运行。良好的电能质量是指电压偏离一般不超过额定值的 $\pm 5\%$; 电力系统的频率应经常保持50Hz, 其偏差在300万kW以上系统不得超过 $\pm 0.2\text{Hz}$, 不足300万kW的系统不得超过 $\pm 0.5\text{Hz}$ 。为了保证上述电压和频率质量指标, 必须经常地、迅速准确地调节水轮机导水叶的开度和发电机的励磁。在发生事故的情况下, 快速地调节, 或自动强行励磁、输电线路事故跳闸后的自动重合闸、依靠低频自启动将备用机组迅速自动投入系统运行、事故后发电机组自同期恢复并列等, 对迅速恢复电能质量, 提高系统事故后的安全稳定运行更具有决定性的意义。运行实践证明, 依靠人工调节和操作, 无论在速度上和准确性方面都是难以实现的。所以, 提高水电站自动化水平, 是保证电力系统电能质量和稳定运行的重要措施。

(3) 提高运行的经济性和调度管理的效应。水轮发电机组在不同的水头下运行具有

不同的效率，即便在同一水头下，不同的导叶开度也具有不同的效率。一个多台机组的水电站，机型不同，其效率特性也就互异，因此根据系统分配给电站的负荷和电站的具体条件，合理选择开机台数，使机组在高效率区运行，可获得好的经济效益。

在电力系统中，有水电和火电配合最优化运行的问题，水电站在一定的蓄水与来水量时，调度得好可以少用水多发电。但拥有水库的水力发电系统的经济运行需考虑水库的经济用水，来水量的随机性、库容的综合利用及长距离输电的线路损耗等，需经多年水文资料做背景来计算，涉及的数据量非常庞大。同时还需考虑负荷变化的随机性，需进行负荷预测的计算。这些计算对经济用水和电力系统内节省燃料起巨大作用，不用电子计算机无法得到这项利益。

当一条河流上有几个水电站，则上下游电站间的协调配合，避免不必要的弃水和防洪监控，可使水力资源得到更加充分的利用。借助电子计算机由梯级监控中心统一调度管理及对电站实行闭环优化控制，就可以增加全梯级的经济效益。

即便是以中小型水电为主的地方电力系统，以县为实体，分级管理，也必须经过集中调度，全面安排电站及用户运行方式，保证发-供-用平衡。依靠调度员对各电站的了解，负荷预测进行静态调度，由于参数采集和监控不实时，制约因素很多。在事故情况下，调度员依靠电话获知信息和发布命令，更难作出及时且正确的判断和处理。只有提高电站自动化及远动化水平，才能及时获知电站运行状况，合理安排全电网的运行方式，保证安全控制和经济合理地调度运行。

(4) 提高劳动生产率，减少运行人员。自动化水电站的大部分操作和大量经常调节任务都由各种自动装置承担，本身就是替代了人工的繁重劳动，并且也大大减少了经常值班的运行人员，还提高了运行管理水平。一般中小型水电站及梯级水电站，根据地区电力系统的情况实行自动化、远动化后，可以改为在管理室值班或减少值班人员，大大提高劳动生产率。

三、提高中小型水电站的自动化和本课程的任务

我国中小型水电站的发展已取得很大进展，小型水电站的单机容量及电站总容量也越来越大。但早期已投产的不少这类电站，自动化水平低，调速器、励磁装置只达到半自动化水平，各种操作阀是手动的，没有配备自动化元件，不少设备还有缺陷。从当前情况看，大部分都有配套改造和提高自动化水平的任务。

虽然我国目前的国情与发达国家有许多不同之处，尤其是对中小型水电站，提高经济效益还并不完全依靠自动化，但随着改革开放的深化，农村形势已逐渐发生变化。为了地处偏僻山区的中小型水电站运行人员的稳定，劳保、福利、补贴费用正在上升，通过提高自动化水平，减少运行人员也将是提高经济效益的一个措施。

中小型水电站，尤其小型水电站自身投资较小，自动化、远动化实施应结合具体电站，注意简化设备、节省投资、采用先进技术及用技术成熟的自动装置将其装备起来，对原有自动化功能进行改进和提高。电站采用计算机控制，首先要解决好电站本身自动化基础，维护检修水平，解决好传感元件，以及各种接口装置，避免出现“大脑发达，四肢不灵”的情况。

近几年来，中小型水电站比较多的一些南方省，在提高电站常规自动化程度的同时，也相继开展以电子计算机在小水电站实现闭环控制，调度室进行远方监控及数据采集和梯级电站集中控制的试点。

根据我国现阶段技术发展状况，以提高中小型水电站的安全、可靠、供电质量及经济运行水平为目的，以新的技术设施和措施进行投入、补偿或更新，也是一定程度的扩大再生产（即内涵扩大再生产）。

本课程根据培养高级应用型专业技术人才的要求，介绍中小型水电站常用的自动装置及计算机在水电站自动化的应用。随着电子技术的发展，水电站自动化的装置在不断地革新，以机组自动控制为例，从继电器有触点控制（目前仍广泛采用，但继电器用得多、体积大、其触点可靠性差）发展成晶体管、集成电路构成的无触点逻辑控制回路，现在又正在向微机构成的顺序控制器发展，其优点是具有很强的逻辑控制功能、很小的体积和很大的灵活性、通用性，且成本低，宜于大规模生产。励磁装置也是蓬勃发展的领域，从电机式励磁机和电磁式励磁调节装置发展成为可控硅静止励磁和晶体管调节器，线路在不断改进，新的装置不断出现。面对提高为数众多的中小型水电站自动化的程度，人才的培养和专业队伍的建设显得十分重要。同时，人们的知识需要大量补充和更新，才能跟上新技术迅速发展的潮流，更好地担负起提高我国中小型水电站自动化水平的任务。

第一章 同步发电机的自动并列

第一节 同期的基本概念、方式和自动并列的意义

同步发电机乃至各个电力系统联合起来并列运行,可以提高电力系统供电的可靠性,改善电能质量,减少系统备用容量,按机组最佳效率和水电站特性,合理分配负荷,实现电力系统的经济运行,经济效益极为明显。

在电力系统中,并列运行的同步发电机转子都以相同的角速度旋转着,转子间的相对位移角也在允许的极限范围内。发电机的这种运行状态称为同步运行。发电机在未投入电力系统以前,与系统中的其他发电机是不同步的。把发电机投入电力系统并列运行,需要进行一系列的操作,称为并列操作或同期操作。这是一项技术要求较高的操作,实现这一操作的装置称为同期装置。

同期操作的方式有两种,即准同期和自同期。

1. 准同期方式

待并发电机在并列前已励磁,调节其电压和频率,在发电机电压、频率和相位均与运行系统的电压、频率和相位相同(或接近相同)时,将发电机断路器合闸,发电机即与系统并列运行。在理想的情况下,合闸瞬间发电机定子电流等于零。

准同期方式的最大优点是:只要并列操作得当,同期时只有较小的电流冲击,对系统电压影响不明显。主要缺点是:电压和频率的调整,相位相同瞬间的捕捉较麻烦,同期过程较长。在系统事故情况下,系统频率和电压急剧变化,同期困难更大。如果采用手动准同期,由于操作人员技术不够熟练,还会有非同期误并列的可能性。

2. 自同期方式

在待并发电机转速升高到接近运行系统同步转速时,将未加励磁的发电机投入系统,然后给发电机加上励磁,待并发电机借助电磁力矩自行进入同步。

自同期方式的优点是:操作简单,并列快。特别是在系统发生事故时,尽管频率和电压波动比较剧烈,机组依然能迅速投入并列。由于待并发电机在投入系统时未励磁,消除了非同期误合闸的可能性。其主要缺点是:合闸瞬间冲击电流较大,并有较大振动,对发电机线圈的绝缘和端部固定部位有一定影响。只要定子线圈绝缘和端部接头无不良现象,可允许在事故情况下采用自同期的并列方式。

无论采用哪种方式,为了保证电力系统安全运行,发电机的并列都应满足以下两个基本要求。

- (1) 投入瞬间的冲击电流不应超过允许值。
- (2) 发电机投入后转子能很快地进入同步运转。

准同期和自同期都可用手动操作或由同期装置自动操作。手动操作所需同期设备比较简单，只需同期表或同期指示灯等。由于同期设备的误差和操作人员技术不够熟练，有可能在同期条件尚未完全满足的情况下误投入，造成较大的电流冲击，因此，手动同期操作的劳动强度较大，要求操作人员有较高的技术水平和实践经验。由于同期操作是水电站运行中一项经常性的重要操作，如果操作不当，可能导致设备损坏，甚至造成严重事故，因此，对于容量较大的发电机，应尽量采用自动同期装置，而以手动准同期作为备用。

自动同期的意义在于：

(1) 在功能比较完善的自动装置操作下，能够实现高度准确同期，对待并机组无冲击损伤、对运行系统无影响。

(2) 可加快并列过程。在系统负荷增加及事故后急需备用机组投入时，意义更为明显。

(3) 自动准同期装置具有频率差和电压差等闭锁环节，消除了误并列的可能性。

(4) 减轻了操作人员的劳动强度。由于电子技术的发展，我国已能批量生产数种功能完善、工作性能可靠的自动准同期装置，来满足不同容量电站的运行要求。所以近几年即使对6000kW以下发电机也在设计时选用自动准同期装置。在目前的水电站电气设计中，一般采用情况是：以自动准同期作为水轮发电机正常的并列方式，以带有非同期闭锁的手动准同期作为备用。自同期则主要用作事故情况下的同期方式，而且均采用自动自同期并列。

第二节 自动准同期

一、准同期并列的允许偏差及自动准同期装置的任务

准同期并列的条件是：电压相等，频率相同，相位相同。但实际操作不可能这么理想，总有一定的误差。因此，根据允许冲击电流的条件，规定了准同期并列允许的频率、电压、相角偏差范围。

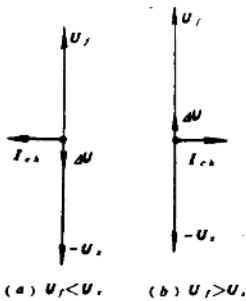


图 1-1 电压差的影响说明图

1. 电压允许偏差

假设其他准同期条件都满足，只是并列点两端电压绝对值不等时，合闸瞬时同样产生冲击电流。因为发电机的阻抗是电感性的，所以，冲击电流的周期分量属于无功电流，如图1-1所示。当发电机电压 $U_g < U_x$ (系统电压) 时，冲击电流 I_{ch} 滞后于 ΔU 90° ，该电流对待并发电机来说是呈容性的，即起助磁作用；对系统中已运行的发电机而言是呈感性的，即起去磁作用。当 $U_g > U_x$ 时，则 I_{ch} 对发电机起去磁作用，使发电机电压下降到等于系统电压，发电机并列之后立即送出无功功率。

无功冲击电流 I_{ch} 不会引起电磁力矩的冲击，从这一点来说并不危险。但是 I_{ch} 过大，将引起发电机定子绕组发热及绕组端部损坏。 I_{ch} 的最大值可近似用下式计算。

$$I_{ch \max} = \frac{1.9\sqrt{2}(U_f - U_x)}{X_d''} = \frac{2.69\Delta U}{X_d''} \quad (1-1)$$

式中 X_d'' ——待并发电机的纵轴次暂态电抗。

为保证发电机的安全，一般要求冲击电流不超过出口短路电流的 $1/20 \sim 1/10$ ，据此从式(1-1)便可得到准同期并列时电压允许偏差的范围为 $5\% \sim 10\%$ 的额定电压。当发电机具有励磁的自动调节装置时，在正常情况下与系统电压是相差不大的。所以对自动准同期装置也不一律要求具有自动调压的功能，只是对电压差进行闭锁。但在没有经常值班人员的水电厂里发生严重的事故降压时，自动地使电压相等对发电机的自动并列就很有必要。

2. 相位允许偏差

如果电压、频率相同，而合闸瞬间相位不同，存在相角差 δ ，此时会引起带有有功性质的冲击电流，如图1-2所示。

当发电机电压 U_f 超前系统电压 U_x 时，冲击电流 I_{ch} 的有功分量 $I_{ch,r}$ 和发电机的电压 U_f 同向，发电机并列后送有功功率；当发电机电压 U_f 滞后系统电压 U_x 时，冲击电流 I_{ch} 的有功分量 $I_{ch,r}$ 和发电机电压 U_f 反向，发电机并列后吸收有功功率。有功冲击电流将产生电磁力矩的冲击。由相位差引起的冲击电流最大值可近似用下式计算。

$$I_{ch' \max} = \frac{2.69U_x}{X_d''} \times 2\sin\frac{\delta}{2} \quad (1-2)$$

并列时 δ 角愈大，冲击电流也愈大，如果在 $\delta = 180^\circ$ 时误合闸，冲击电流为最大，等于发电机出口三相短路电流的2倍。

若要求冲击电流不超过发电机出口三相短路电流的 $1/10$ ，则可算出 $\sin\delta = 0.1$ ， $\delta = 5.73^\circ$ 。通常要求合闸时相位差 δ 不超过 10° 。

3. 频率允许偏差

频率不等意味着两个电压相量之间存在相对运动。若把一个相量看作静止不动，则另一个相量就一会儿与他重合，一会儿又离开他，两个相量之差 ΔU 就时大时小形成脉动电压，从而也就产生脉动电流。脉动电流将引起刚并入系统的发电机在很短时间内就发出（或吸收）过多的功率，使发电机轴产生振动，严重时可能失去同步。故要求待并发电机与运行系统的频率差不超过 $0.2\% \sim 0.5\%$ ，即 $0.1 \sim 0.25\text{Hz}$ ，所以并列时必须对频率差进行检查。

自动准同期装置，除对频率差进行闭锁外，还要求具有自动调频的功能，由他在并列过程中对发电机频率进行调节。

4. 自动准同期装置的功能

为了实现上述三个准同期允许偏差条件的要求，自动准同期装置必须具备：①调频，②调压，③在发电机的频率和系统频率已经调到所允许的偏差值以后，在发电机和系统的

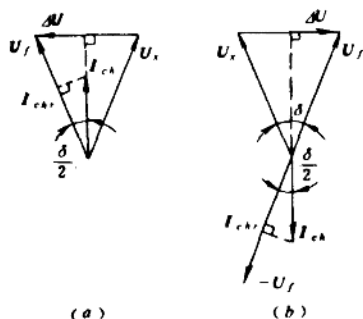


图 1-2 相位差的影响说明图

电压无论相位或数值都已接近相等时，提前一段时间（等于断路器动作时间），发出合闸脉冲，待相位和数值相等时，合闸动作完成。

如果①、②两项是由电厂的运行人员用手来进行操作的，自动装置只完成③项任务，就称为半自动准同期装置。

二、脉动电压的分析

自动准同期装置为了完成上述任务，一般都是利用接到它上面的脉动电压的特性。脉

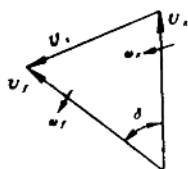


图 1-3 脉动电压旋转相量

动电压的特性可用电压相量和电压波形来进行分析。

1. 电压旋转相量分析

设待并发电机电压 U_f 以角速度 ω_f 旋转，电力系统的电压 U_x 以角速度 ω_x 旋转，则脉动电压为 $U_s = U_f - U_x$ ，滑差角速度为 $\omega_s = \omega_f - \omega_x$ 。假定 U_x 不动、 U_f 以 ω_s 相对 U_x 转动，其旋转相量见图 1-3。

如果 $|U_f| = |U_x| = U$ ， $U_m = \sqrt{2}U$ ，从图 1-3 可得：

$$U_{sm} = 2U_m \sin \frac{\delta}{2} \quad (1-3)$$

$$\delta = (\omega_f - \omega_x)t \quad (1-4)$$

从式 (1-3) 可见， $\delta = 0$ 时， $U_{sm} = 0$ ； $\delta = 180^\circ$ 时， $U_{sm} = 2U_m$ ； $\delta = 360^\circ$ 时， $U_{sm} = 0$ ，脉动电压幅值完成一个周期的变化。在 $\delta = 180^\circ$ 时，脉动电压幅值为最大值。

2. 脉动电压波形分析

待并发电机电压与运行系统的电压瞬时值分别为：

$$u_f = \sqrt{2}U_f \sin \omega_f t$$

$$u_x = \sqrt{2}U_x \sin \omega_x t$$

先看 $\sqrt{2}U_f = \sqrt{2}U_x = U_m$ 的情况。为便于讨论，假定 ω_x 和 ω_f 在此讨论的范围内是不变的，则脉动电压瞬时值为：

$$\begin{aligned} u_s &= U_m (\sin \omega_f t - \sin \omega_x t) \\ &= 2U_m \sin \frac{\omega_f - \omega_x}{2} t \cdot \cos \frac{\omega_f + \omega_x}{2} t \end{aligned} \quad (1-5)$$

脉动电压瞬时值波形如图 1-4 所示，其频率为 $\frac{\omega_f + \omega_x}{2(2\pi)}$ ，接近 50Hz 工频；其幅值为

$2U_m \left| \sin \frac{\omega_f - \omega_x}{2} t \right|$ ，就是说脉动电压的幅值是按 $\frac{1}{2}$ 滑差角速度变化的，是时间的正弦函数。将脉动电压变化的幅值用虚线连在一起，可得脉动电压低频包络线，见图 1-4(b)，其周期为：

$$T_s = \frac{1}{f_s} = \frac{2\pi}{\omega_s} \quad (1-6)$$

从式 (1-6) 可见，当频率差较大时，周期 T_s 就较短；反之，当频率差较小时， T_s 就较长，故可用 T_s 的长短反映频率差的大小。例如发电机并列允许频率偏差范围为 0.1~0.25Hz，则相应的脉动电压周期为 $T_s = 10 \sim 4s$ 。

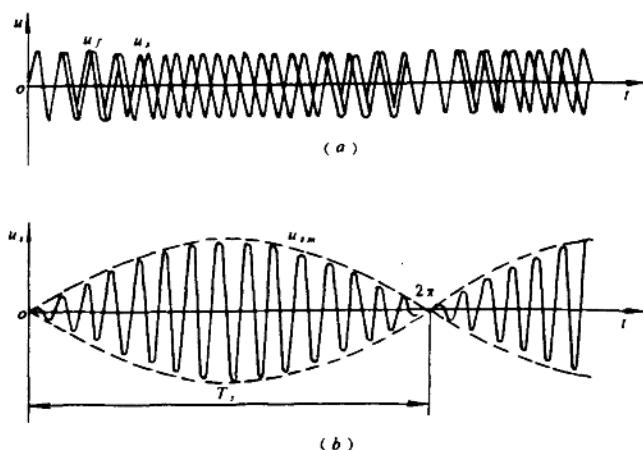


图 1-4 脉动电压瞬时值波形

从式 (1-3) 及图 1-4(b) 可知, 在 $U_f = U_x$ 的条件下, $\delta = 0$ 及 $\delta = 2\pi$ 时, 脉动电压的幅值为最小值, 即 $U_{sm} = 0$ 。如果 U_f 不等于 U_x , 则脉动电压最小值为 $|\sqrt{2}U_f - \sqrt{2}U_x|$ 。因此, 可从脉动电压最小值的大小, 判断电压差的大小。

综上所述, 脉动电压周期的长短反映频率差, 脉动电压过零反映电压差为零和相位一致, 故用脉动电压的特性来检测频率差、电压差和相位是否满足并列要求是十分有效的。

三、自动准同期装置的基本原理和类型

1. 准同期合闸脉冲时间的选择

不论手动或自动准同期, 在满足准同期并列的条件下, 为了使断路器触头在 $\delta = 0$ 瞬间闭合, 同期装置必须提前发出合闸脉冲。因为从发出合闸脉冲到断路器触头闭合, 需经历合闸继电器、合闸接触器和断路器相继联动的过程。这一提前时间称导前时间, 以 t_{dq} 表示。由于 t_{dq} 应根据断路器等的合闸时间整定, 不随频率差大小而变, 与频率无关, 所以, 按此原理构成的自动准同期装置称为恒定导前时间的准同期装置, 目前已得到广泛采用。

另一种同期装置与上述恒定导前时间不同, 而是取一个恒定的导前相角 δ_{dq} 发出合闸脉冲。就是说不管脉动电压的周期大小, 总是在脉动电压过零以前, 以恒定的导前相角 δ_{dq} 发出合闸脉冲。在导前相角一定的条件下, 导前时间将随频率差 f_s 变化, 而不是定值。因此, 这种装置很难保证断路器触头刚好在脉动电压过零时闭合。唯有这种原理构成的自动准同期装置结构比较简单, 用几只电压继电器接入脉动电压有效值电压回路, 即可实现恒定导前相角发出合闸脉冲, 但现已较少采用。

2. 恒定导前时间自动准同期装置的类型

目前我国生产和采用的自动准同期装置, 大部分是属于恒定导前时间型的。型号主要有 ZZQ-1、ZZQ-3A、ZZQ-4、ZZQ-5 和 ZZT-2A。他们都是采用脉动电压 (或将他变换一下波形) 的一次微分和脉动电压相比较这一原理获得恒定的导前时间。采用一次微分的目的是为了消除导前时间与频率的关系。

除 ZZQ-1 型外, 其余几种类型都将脉动电压通过相敏整流和滤波变换成线性的三角

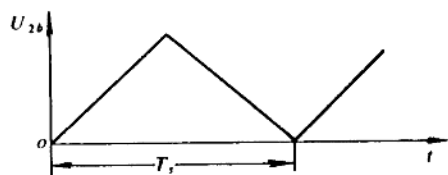
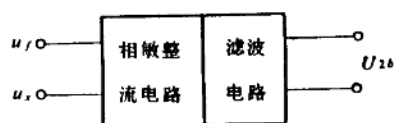


图 1-5 线性整步电压

波形整步电压 U_{2b} ，如图1-5所示。三角波整步电压具有良好的线性，以保证导前时间恒定。ZZQ-1型则直接反映脉动电压有效值（现在已不再生产）。

在图 1-5 中三角波整步电压的周期 T_s 就是脉动电压的周期，频率 f_s 愈大，脉动电压的周期 T_s 愈短，线性的三角波整步电压 U_{2b} 的斜率就愈大，据此可用来判断频率差是否满足要求。在 ZZT-2A 中，频率条件是检查某一给定角度 δ_B （对应于一定的整定电位 U_B ）所经历的时间 t_B ，要求满足

$$t_B \geq \frac{\delta_B}{\omega_{s, yu}} \quad (1-7)$$

式中 $\omega_{s, yu}$ ——允许的滑差角速度。

ZZQ-3A型与ZZQ-4型原理相同，设有自动调频部分，可实现发电机频率对系统频率的自动追踪，目前在中小型水电站应用较多。ZZQ-5和ZZT-2A除自动调频外，还设有自动调压部分，可在并列过程中对发电机电压进行自动调节。ZZT-2A在合闸部分采用了双回路系统，能够互相监视，从而提高了合闸部分的可靠性；还设有自启动及双回路系统故障信号，适应自动开机和便于远方监视，功能更加完善。

第三节 ZZQ-3A型自动准同期装置

ZZQ-3A型装置由合闸、调频、电源等部分组成。

一、自动合闸部分

合闸部分的原理方框图见图1-6。通过线性整步电压发生器将脉动电压变成三角波整步

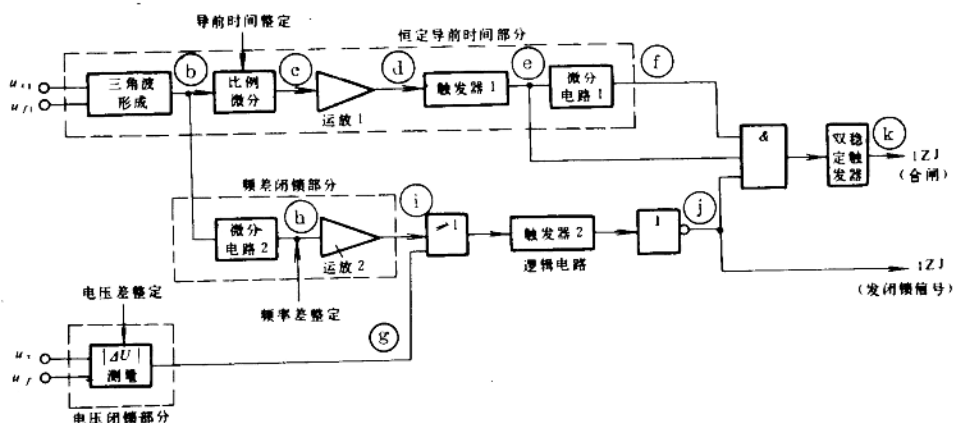
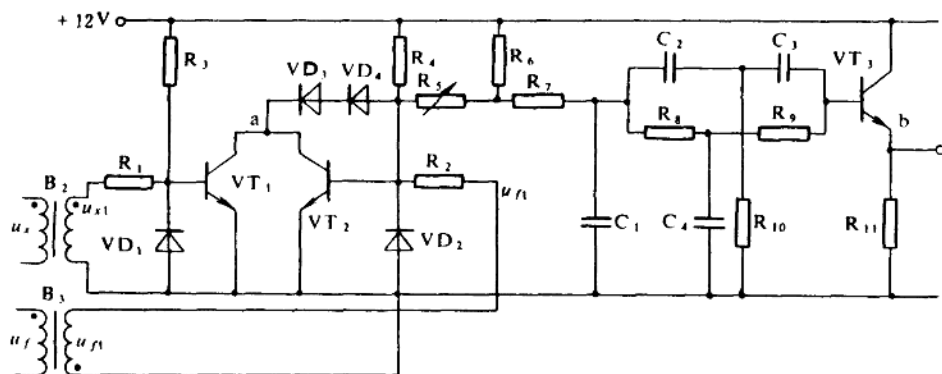


图 1-6 ZZQ-3A 自动合闸部分原理方框图

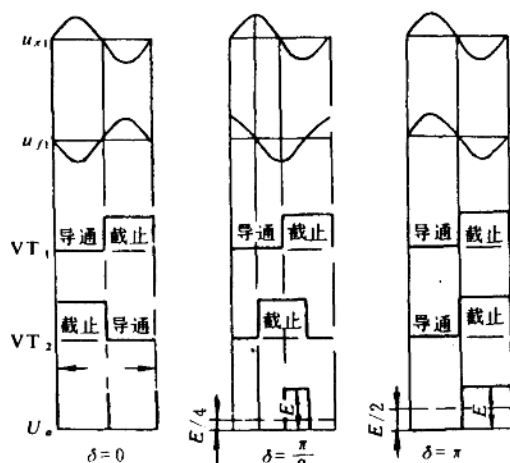
电压。整步电压分两路输出：一路经比例微分环节、运算放大器1、触发器1，在e点发出一个恒定导前时间的宽脉冲，再经反相和微分电路1，在f点发出一个恒定导前时间的负窄脉冲，经与门使双稳态触发器翻转，发出合闸脉冲。另一路经微分电路2、运算放大器2，在i点输出一个与允许频差有关的闭锁信号，和从8点输出与允许压差有关的闭锁信号一起，经或门、触发器2、反相器，使合闸脉冲闭锁。现将各单元电路分述如下。

1. 线性整步电压的产生

线性整步电压由相敏电路和滤波电路产生。相敏电路有各种不同的接线，ZZQ-3A的电路如图1-7所示。



(a)



(b)

图 1-7 相敏整流电路

(a)原理接线图；(b) a点波形图

(1) 相敏电路的作用。在图1-7中， u_{f1} 和 u_{x1} 分别经限流电阻 R_1 、 R_2 加到三极管 VT_1 、 VT_2 的基极，只有 VT_1 、 VT_2 的基极电位同时为负，a点才输出高电平，否则，因为 VT_1 或 VT_2 导通，a点电位接近于0。为了分析a点输出的波形，考虑三种典型的情况，