



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

电力系统 自动装置

唐建辉 黄红荔 合编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

电力系统 自动装置

唐建辉 黄红荔 合 编
杨利水 崔宝华 主 审



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材。

全书共分九章：第一章介绍电力系统自动化的基本内容、作用及发展远景；第二章阐述同步发电机自动准同步并列；第三章叙述同步发电机励磁系统及励磁调节器工作原理；第四章剖析电力系统频率的一次调节、二次调节的动态行为，分析调节准则；第五章阐述输电线路自动重合闸装置的原理、应用；第六章分析备用电源和备用设备自动投入装置典型接线；第七章介绍电力系统自动按频率减负荷装置；第八章介绍电力系统其他安全控制装置；第九章介绍故障录波装置。

本书为职业教育电力系统及其相关专业教材，也可供相关专业人员和工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统自动装置/唐建辉, 黄红荔编. —北京: 中国电力出版社, 2005

教育部职业教育与成人教育司推荐教材

ISBN 7-5083-3520-1

I. 电... II. ①唐...②黄... III. 电力系统-自动装置-高等学校: 技术学校-教材 IV. TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 079674 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>)

利森达印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2005 年 9 月第一版 2006 年 8 月北京第二次印刷
787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 13.875 印张 293 千字
印数 3001—6000 册 定价 18.00 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)

前言

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材，是根据教育部审定的电力技术类专业主干课程的教学大纲编写而成的，并列入教育部《2004~2007年职业教育教材开发编写计划》。本书经中国电力教育协会和中国电力出版社组织专家评审，又列为全国电力职业教育规划教材，作为职业教育电力技术类专业教学用书。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标；符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位资格和技术等级要求；具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性；符合职业教育的特点和规律，具有明显的职业教育特色；符合国家有关部门颁发的技术质量标准。本书既可以作为学历教育教学用书，也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

本教材是根据培养生产一线应用型职业教育人才需要，针对我国电力工业发展的实际，在总结教学经验、吸收以往教材长处及有关工程技术人员意见的基础上编写的。

本教材力求对装置的原理作深入的讲述和分析，内容由浅入深，讲述清楚，图文并茂，具有渐进性和启发性，对电力系统广泛应用的新知识、新技术也作相应的介绍。

本书由福建电力职业技术学院唐建辉、黄红荔合编。华北电力大学电气工程学院刘连光教授对教材编写大纲进行了评审，全书由保定电力职业技术学院杨利水老师和崔宝华老师主审，他们对本书的编写提出了许多的宝贵意见，同时，在编写过程中还得到同行们的大力支持和帮助，在此谨致谢意。

由于编者水平有限，书中的不妥和错误之处，恳请广大师生和读者给予批评指正。

编者

2005年5月

目 录

前言	
第一章 绪论	1
第二章 同步发电机的自动并列装置	3
2.1 概述	3
2.2 准同步	4
2.3 同步条件检查	8
2.4 频差方向鉴别	17
2.5 压差鉴别	20
2.6 ZZQ-5型自动准同步装置	21
2.7 数字式并列装置	36
复习思考题	41
第三章 同步发电机的自动调节励磁装置	42
3.1 同步发电机励磁系统	42
3.2 同步发电机励磁方式和励磁调节方式	47
3.3 同步发电机励磁系统中的可控整流电路	54
3.4 半导体励磁调节器工作原理	62
3.5 励磁调节器的静特性调整及并联运行发电机间无功功率的分配	74
3.6 同步发电机继电强行励磁	81
3.7 同步发电机的灭磁	84
3.8 同步发电机励磁系统举例	88
复习思考题	104
第四章 电力系统频率和有功功率的自动调节	105
4.1 电力系统的功率—频率特性	105
4.2 电力系统调频方式与准则	113
4.3 电力系统的经济调度与自动调频	119
复习思考题	125
第五章 输电线路的自动重合闸	126
5.1 输电线路的自动重合闸的作用及基本要求	126
5.2 单侧电源线路三相一次自动重合闸	128
5.3 双侧电源线路三相自动重合闸	133
5.4 自动重合闸与继电保护的配合	138
5.5 综合自动重合闸简介	140

	复习思考题	146
第六章	备用电源和备用设备自动投入装置 ATS	147
	6.1 备用电源和备用设备自动投入装置的作用及基本要求	147
	6.2 备用电源自动投入装置的典型接线	149
	复习思考题	153
第七章	按频率自动减负荷装置 AFL	155
	7.1 概述	155
	7.2 电力系统频率特性	156
	7.3 按频率自动减负荷装置的工作原理	159
	7.4 按频率自动减负荷装置	163
	复习思考题	166
第八章	电力系统其他安全自动控制装置	167
	8.1 自动解列装置	168
	8.2 水轮机组低频自启动	169
	8.3 自动切机和电气制动	171
	8.4 电力系统安全自动控制装置	174
	复习思考题	175
第九章	故障录波装置	176
	9.1 概述	176
	9.2 故障录波装置基本原理	177
	9.3 故障录波装置的应用	183
	复习思考题	185
附表一	新旧文字符号对照说明表	186
	参考文献	187

绪 论

电力系统的安全稳定运行直接关系到国民经济的发展和人民群众的生活。随着经济建设的发展,电力系统向着高电压、大机组、现代化大电网发展,系统运行方式的变化越来越频繁,对电力系统的运行提出了更高的要求。如何保证电力系统的安全稳定运行,给经济建设和人民生活提供连续不间断的、高质量的电能,是摆在电力工作者面前的重大课题。

一、电力系统及其运行特点

与其他产品生产过程不同,电能生产过程的最大特点是不能储藏,生产(发电)、输送、分配、使用是同时进行的。因此,电力系统运行中发生的问题,如处理不及时或不正确,将影响电力系统正常运行,甚至造成大面积的停电,或对重要用户长时间中断供电。电能生产过程的另一特点是从电源到负荷是一个紧密连接的且分布十分广泛的大系统。因此,电力系统中的局部故障,如处理不当,会影响整个电力系统的安全运行。显然,仅凭人工进行监控是无法满足电力系统运行要求的。为满足电力系统安全经济运行的要求,电力系统必须借助于自动装置来完成对电力系统及设备监视、控制、保护和信息传递。因此,自动化技术就成了必不可少的手段。

二、电力系统自动化的基本内容和作用

电力系统自动化的主要任务有:

(1) 保证电能质量。电力系统频率和电压是衡量电能质量的两个重要指标,频率或电压偏离额定值一定范围对用户和电力系统都将产生不利影响,严重时将造成系统的瓦解。通过频率和有功功率的调节、电压和无功功率的调节,能使系统频率和电压在允许范围之内变动,从而保证了电能质量。

(2) 提高系统运行安全性。确定运行方式对电力系统的安全运行极其重要,通过计算机程序化的事故预想,能够实现对系统当前的运行状况进行详细的安全分析,确定具有足够承受事故冲击能力的运行方式。

(3) 提高事故处理能力。一旦电力系统中发生事故,迅速正确地处理事故,是减小事故损失、尽快恢复正常运行的保证。电力系统自动化水平影响着事故处理的效果,目前,我国主要通过安全自动装置实现局部的故障处理。

(4) 提高系统运行经济性。在系统安全运行、保证用户有合格电能质量的前提下,整个电力系统处在最经济的运行状态,其发电成本是最小的。

电力系统自动化技术包括两方面的内容:一是电力系统自动装置,二是电力系统调度自动化,也就是电力系统实时调度。

电力系统自动装置包括备用电源和备用设备自动投入、输电线路自动重合闸、同步发电机自动并列、同步发电机励磁自动调节及强行励磁、自动低频减负荷、电力系统频率和有功功率自动调节、故障录波装置、自动解列等。其中,备用电源和备用设备自动投入、输电线路自动重合闸,与继电保护配合可提高供电的可靠性;同步发电机励磁自动调节和强行励磁装置可提高电力系统的稳定性;按频率自动减负荷装置可防止电力系统因事故发生功率缺额

时频率的过度降低,保证了电力系统的稳定运行和重要负荷的正常工作;自动解列装置可防止系统稳定破坏时引起系统长期大面积停电和对重要地区的破坏性停电。它们对保证电力系统安全运行,提高供电可靠性具有重要作用。

同步发电机励磁自动调节装置还可保证系统运行时的电压水平;电力系统频率和有功功率自动调节装置可保证电力系统正常运行时有功功率的自动平衡,使系统频率在规定范围内变动。它们对保证电能质量起重大作用。

同步发电机自动并列装置不仅保证了同步发电机并列操作的正确性和操作安全性,而且减轻了运行人员的劳动强度。当电力系统发生故障要求发电机组迅速投入时,同步发电机自动并列装置还可以加快并列操作的过程。

电力系统调度自动化主要内容有,借助远动装置,利用快速计算机,对瞬息万变的电力系统各种运行方式下的实时数据进行收集和处理,实现对电力系统的状态估计、调度决策,以满足实时调度的需要,保证电能质量,保证系统安全运行和经济运行。利用调度自动化系统,在有功功率自动平衡的基础上,进行有功出力的合理分配,以实现电网的经济调度,合理利用能源。电力系统调度自动化的另一重要内容,是借助调度计算机对电力系统进行安全分析(事故的实时预想),以供调度人员选择合理的最优运行方式,从而大大提高系统的安全水平。系统事故发生后,调度计算机能根据系统的实时运行情况和事故情况提供正确的强有力的事故处理措施,从而将事故的影响减小到最低的程度。因此,电力系统调度自动化是一项效果显著、经济效益高、提高系统安全经济运行水平的技术措施。

三、电力系统自动化技术的发展

我国电力系统自动化在50年代前几乎是空白。50年代后,随着计算机技术和数字通信技术的发展,电力系统自动化技术也得到了很快的发展,通过计算机不但能够实现复杂的调节和控制,而且使大量运行数据和信息处理实现实时化。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,世界上已经有许多国家和地区电力系统应用了先进的自动化系统,我国在这领域的研究和实践也取得了进展,各种自动装置正在实现微机化,电力系统的综合自动化水平在不断提高。

同步发电机的自动并列装置

内 容 提 要

本章围绕准同期基本原理和实现准同期的方法进行分析,主要介绍了 ZZQ-5 型自动准同期装置和数字式并列装置。

学习本章的目的是:熟悉并掌握关于并列的一些基本概念,如同步运行、并列操作、准同步并列、自同步并列、准同步并列条件、导前时间、自动准同步装置、整步电压等;从框图上熟悉线性整步电压的获得方法、波形及特点。在此基础上掌握 ZZQ-5 型装置的构成及功能,通过构成框图和波形图掌握合闸部分各环节的原理,尤其是合闸方框图的原理,熟悉频差方向鉴别方法及对调频部分的基本要求、调频部分的构成方框图,分析波形及特点;了解压差大小和方向鉴别的方法及调压部分的构成;清楚各部分之间的联系及 ZZQ-5 型装置的主要技术参数;对数字式并列装置的特点、硬件、软件有一定的了解。

2.1 概 述

2.1.1 电力系统并列操作

电力系统中,各发电机是并联在一起运行的。并列运行的同步发电机,其转子以相同的电角速度旋转,称之为同步运行。一般来说,发电机在没有并入电网前,与系统中的其他发电机是不同步的。

电力系统中的负荷随机变化,为保证电能质量,并满足安全和经济运行的要求,需经常将发电机投入和退出运行,把一台待投入系统的空载发电机经过必要的调节,在满足并列运行的条件下经开关操作与系统并列,这样的操作过程称为并列操作。在某些情况下,还要求将已解列为两部分运行的系统进行并列,同样也必须满足并列运行条件才能进行并列操作,其并列操作的基本原理与发电机并列相同,但调节比较复杂,且实现的具体方式有一定差别。

电力系统这两种基本并列操作以同步发电机的并列操作最为频繁和常见,如操作不当或误操作,将产生极大的冲击电流,破坏发电机,引起系统电压波动,甚至导致系统振荡,破坏系统稳定运行。采用自动并列装置进行并列操作,不仅能减轻运行人员的劳动强度,也能提高系统运行的可靠性和稳定性。

2.1.2 同步发电机的并列方法

实现发电机并列操作的方法通常有准同步并列操作(也称准同期并列操作)和自同步并列操作(也称自同期并列操作)两种方法。

准同步并列的方法是:发电机在并列合闸前已加励磁,当发电机电压的幅值、频率、相位分别与并列点系统侧电压的幅值、频率、相位接近相等时,将发电机断路器合闸,完成并

列操作。自同步并列的方法是：将未加励磁、接近同步转速的发电机投入系统，随后给发电机加上励磁，在原动机转矩、同步力矩的作用下将发电机拉入同步，完成并列操作。准同步并列的最大优点是并列时冲击电流小，不会引起系统电压降低；其不足是并列操作过程中需要对发电机电压、频率进行调整，并列时间较长且操作复杂，另外，如果合闸时刻不准确，可能造成非同步合闸。自同步并列的最大优点是并列过程中不存在调整发电机电压、频率的问题，并列时间短且操作简单，在系统电压和频率降低的情况下，仍有可能将发电机并入系统，容易实现自动化；不足是并列发电机未经励磁，并列时会从系统中吸收无功而造成系统电压下降，同时产生很大的冲击电流。所以准同步并列是发电机主要的并列方式，在电力系统故障情况下，有些水轮发电机可以采用自同步方式并列。

按自动化程度不同，准同步并列分为手动准同步、半自动准同步和自动准同步，本章主要介绍自动准同步装置实现的自动准同步并列。

在发电厂和变电所中，两侧均有电源可以进行并列操作的断路器称为同步点。例如：发电机、发电机双绕组变压器组高压侧、发电机三绕组变压器组各电源侧的断路器都是同步点，用以实现一台发电机的并列操作；母线联络断路器是同步点，作为同一母线上所有发电单元的后备同步点；双绕组变压器、三绕组变压器各电源侧断路器都是同步点，在任一侧故障断开或检修后恢复时，可以减少并列过程中的倒闸操作，保证迅速可靠地恢复供电；母联、旁路、35kV 及以上系统联络线等的断路器都是同步点。母线分段断路器一般不作为同步点，因为低压侧母线解列时，高压侧是连接的，没有同期要求。

需要指出，对某些同步点，当进行准同步时，要利用变压器其他侧的电压进行同步检定，此时应注意变压器两侧电压是否存在相位差。通常变压器为 Y, d11 连接，采用 Δ 侧电压在 Y 侧实现准同步时，可用接线为 D, y1 和相电压变比为 $100/\frac{100}{\sqrt{3}}$ 的中间转角变压器进行相位补偿。

2.2 准同步

以下分析讨论采用准同步方法将发电机与无穷大电力系统并列的情况。

2.2.1 滑差

如图 2-1 所示，待并发电机已加励磁，机端电压为 \dot{U}_G ，断路器系统侧电压为 \dot{U}_{sys} 。在并列断路器 QF 合闸前，其两侧电压的幅值、频率、相位一般不相等，当两侧电压的频率不等时，在相量图上 \dot{U}_G 和 \dot{U}_{sys} 以不同的电角速度 ω_G 和 ω_{sys} 旋转，如果以系统侧电压为基准，则发电机以 $\omega_G - \omega_{sys}$ 的相对电角速度旋转，此相对电角速度记为 ω_s ，即

$$\omega_s = \omega_G - \omega_{sys} = 2\pi(f_G - f_{sys}) = 2\pi f_s \quad (2-1)$$

式中： $f_s = f_G - f_{sys}$ 称为滑差频率； $\omega_s = \omega_G - \omega_{sys}$ 称为滑差角频率，简称滑差。滑差是分析讨论发电机并列过程的一个非常重要的参数。

如果从 \dot{U}_G 和 \dot{U}_{sys} 同相位时开始计时，则 \dot{U}_G 和 \dot{U}_{sys} 之间的相角差 δ 为

$$\delta = |\omega_G - \omega_{sys}| t = |\omega_s| t \quad (2-2)$$

我们称 δ 变化 360° ($2\pi\text{rad}$) 所用的时间为滑差周期 T_s , 如果滑差在一个周期内保持不变, 则滑差周期与滑差、滑差频率有如下关系

$$T_s = \frac{2\pi}{|\omega_s|} = \frac{1}{|f_s|} \quad (2-3)$$

显然, T_s 的大小反映了待并发电机和系统之间频率差的大小, T_s

小则表示频差大, T_s 大则表示频差小。我们可以将这一结论用于检测待并发电机是否满足并列条件。

2.2.2 准同步条件分析

发电机以准同步的方式并列时, 必须对发电机进行适当的调整, 使其满足一定的条件时才能进行并列操作。发电机并列操作应该遵循以下原则:

- (1) 并列瞬间, 发电机的冲击电流应尽可能小, 不应超过允许值。
- (2) 并列后, 发电机应能迅速进入同步运行, 暂态过程要短。

因此, 图 2-1 (a) 实现发电机并列, 在 QF 合闸瞬间, 如果发电机电压 \dot{U}_G 和系统侧电压 \dot{U}_{sys} 满足三个条件: 幅值相等、频率相等、相位相同, 即 $\dot{U}_G = \dot{U}_{\text{sys}}$, $f_G = f_{\text{sys}}$, 则不会产生冲击电流, 这就是理想的准同步并列条件。实际上, 发电机并列时, 这三个条件是难以同时满足的, 例如, 如果两个电压的频率相等, 则相位差不会发生变化, 无法满足相位相同的条件, 而存在频率差时, 两电压之间的相位差作周期性变化, 可以在某一时刻满足相位相同的条件。当发电机不满足理想准同步并列条件时, 断路器合闸瞬间必然产生冲击电流, 并且影响发电机进入同步运行的暂态过程, 严重时可能损坏发电机或发电机并列不成功。

以下讨论发电机并列时不满足理想准同步条件的情况。

设发电机并列合闸瞬间 $\dot{U}_G \neq \dot{U}_{\text{sys}}$, \dot{U}_G 与 \dot{U}_{sys} 之间的相位差为 δ , 则有电压差

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_G - \dot{U}_{\text{sys}}$$

合闸瞬间产生的冲击电流

$$\dot{i}_{\text{im}} = \frac{\dot{U}_G - \dot{U}_{\text{sys}}}{jX'_d} = \frac{\Delta \dot{U}}{jX'_d} \quad (2-4)$$

式中 X'_d ——发电机次暂态电抗 (设为隐极机)。

1. 存在电压差

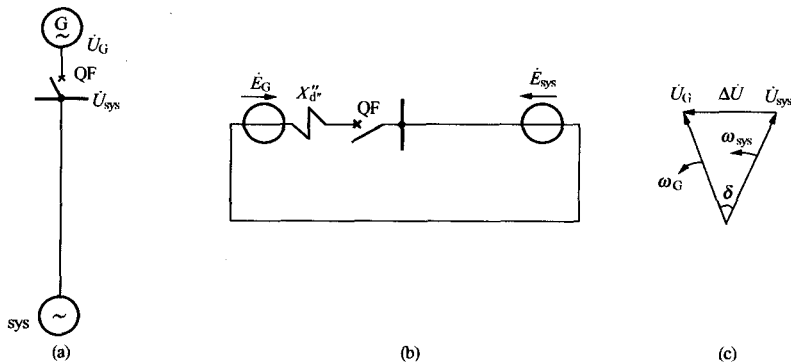


图 2-1 发电机与系统并列示意图
(a) 一次系统图; (b) 等值电路图; (c) 电压相量图

设 \dot{U}_G 与 \dot{U}_{sys} 相位相同 ($\delta = 0$), $f_G = f_{sys}$, 但 $U_G \neq U_{sys}$ 。由式 (2-4) 可知, 在并列瞬间产生冲击电流周期分量有效值为

$$I_{im} = \frac{|U_G - U_{sys}|}{X''_d} = \frac{|\Delta U|}{X''_d} \quad (2-5)$$

相量图如图 2-2 所示。

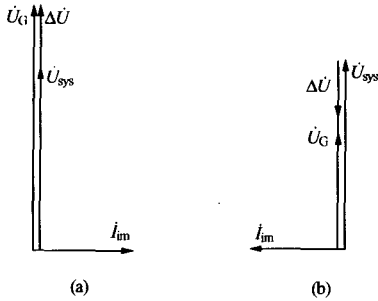


图 2-2 \dot{U}_G 和 \dot{U}_{sys} 幅值不等时的相量图
(a) $U_G > U_{sys}$; (b) $U_G < U_{sys}$

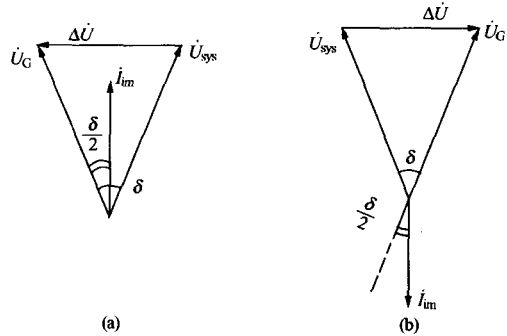


图 2-3 \dot{U}_G 和 \dot{U}_{sys} 相位不等时的相量图
(a) \dot{U}_G 超前 \dot{U}_{sys} ; (b) \dot{U}_G 滞后 \dot{U}_{sys}

当 $U_G > U_{sys}$ 时, \dot{I}_{im} 滞后 \dot{U}_G 90° 对发电机起去磁作用, 发电机并列后立即带无功负荷; 当 $U_G < U_{sys}$, \dot{I}_{im} 超前 \dot{U}_G 90° 对发电机起助磁作用, 发电机并列后立即从系统吸收无功功率。如果 ΔU 很大, 则 \dot{I}_{im} 过大时, 将会引起发电机定子绕组发热, 或定子绕组端部在电动力的作用下受损。因此, 必须限制发电机并列合闸瞬间的电压差, 一般要求电压差不应超过额定电压的 $5\% \sim 10\%$ 。

2. 存在相位差

设 $f_G = f_{sys}$, $U_G = U_{sys} = U$, 但 \dot{U}_G 与 \dot{U}_{sys} 相位不同 ($\delta \neq 0$), 相量图如图 2-3 所示。由式 (2-4) 可知, 在并列瞬间产生冲击电流, 有效值为

$$I_{im} = \frac{\Delta U}{X''_d} = \frac{2U}{X''_d} \sin \frac{\delta}{2} \quad (2-6)$$

由式 (2-6) 可见, 如果 δ 很大 (180° 范围内), 则使冲击电流 I_{im} 很大, 其有功分量电流在发电机轴上产生冲击力矩, 严重时损坏发电机。因此, 从合闸瞬间不产生较大的冲击电流考虑, 应在 δ 接近于零时合闸。如果合闸瞬间存在不大的相位误差, 当 \dot{U}_G 超前 \dot{U}_{sys} 时, \dot{I}_{im} 的主要成分为与 \dot{U}_G 同相位的有功分量, 发电机并入系统时立即发出有功功率, 对发电机有制动作用, 有助于将发电机电压拉到与系统电压同相位; 当 \dot{U}_G 滞后 \dot{U}_{sys} 时, \dot{I}_{im} 主要成分为与 \dot{U}_G 反相的有功分量, 发电机并入系统时立即从系统吸收有功功率, 对发电机有

加速作用，同样有助将发电机电压拉到与系统电压同相位，通常准同步并列操作允许的合闸相位差不应超过 5° 。

3. 存在频率差

设 $\dot{U}_G = \dot{U}_{sys}$ ，但 $f_G \neq f_{sys}$ 。此时，由于发电机电压和系统电压的频率不相等，在相量图上 \dot{U}_G 与 \dot{U}_{sys} 之间具有相对运动，如果频差较大，则并列合闸后的 δ 在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间周期性变化，如图 2-4 所示：

当 $\delta = 0^\circ$ 时， $\Delta U = 0$ ，则 $I_{im} = 0$ ；

当 $\delta = 180^\circ$ 时， $\Delta U = 2U_G = 2U_{sys}$ ，则 I_{im} 最大；

当 $\delta = 360^\circ$ (0°) 时， $\Delta U = 0$ ，则 $I_{im} = 0$ 。

可见，发电机在频差较大的情况下并入系统，立即带上较多正的（或负的）有功功率，对转子产生制动（或加速）的力矩，使发电机产生振动，严重时导致发电机失步，造成并列不成功。因此，必须控制发电机并列时的频率差。一般准同步并列时的允许频率差范围为额定频率的 $0.2\% \sim 0.5\%$ 。对工频额定频率 50Hz ，允许频率差为 $0.1 \sim 0.25\text{Hz}$ 。

综上所述，发电机准同步并列的实际条件是：

(1) 待并发电机与系统电压幅值接近相等，电压差不应超过额定电压的 $5\% \sim 10\%$ 。

(2) 在断路器合闸瞬间，待并发电机电压与系统电压的相位差应接近零，误差不应大于 5° 。

(3) 待并发电机电压与

系统电压的频率应接近相等，频率差不应超过额定频率的 $0.2\% \sim 0.5\%$ 。

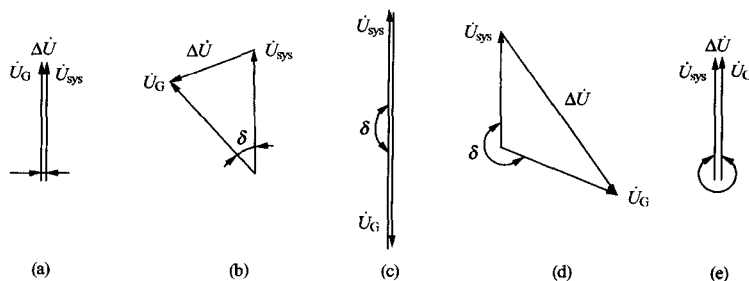


图 2-4 \dot{U}_G 和 \dot{U}_{sys} 频率不等时的相量图

(a) $\delta = 0^\circ$; (b) $0^\circ < \delta < 180^\circ$; (c) $\delta = 180^\circ$;

(d) $180^\circ < \delta < 360^\circ$; (e) $\delta = 360^\circ$ (0°)

2.2.3 合闸脉冲命令的发出

在电压差、频率差满足要求的情况下，并列断路器主触头闭合时，应使 δ 等于 0° 。由于断路器的合闸过程有一定的时间，作为自动准同步装置，发出合闸脉冲，必须在 $\delta = 0^\circ$ 导前一个时间 t_{ad} ，显然 t_{ad} 为从发出合闸脉冲起到断路器主触头闭合止中间所有元件动作时间之和，其中主要为并列断路器的合闸时间，一般约为 $0.1 \sim 0.7\text{s}$ 。为使断路器主触头闭合时 $\delta = 0^\circ$ ，导前时间 t_{ad} 不应随频差、压差而变，是一个固定的数值，所以有恒定导前时间之称，以此原理制成的装置也被称为恒定导前时间式自动准同步装置。

作为自动准同步装置，应能自动检定待并发电机和系统母线间的压差、频差大小，当满足要求时，导前 ($\delta = 0^\circ$) t_{ad} 时间自动发出合闸脉冲命令，使断路器主触头闭合时 $\delta = 0^\circ$ 。如果压差或频差不满足要求，则检出压差和频差方向，对待并发电机进行电压或频率的调整，以加快自动并列的过程。

2.3 同步条件检查

由上分析可见,发电机采用准同步方式与系统并列时,必须检查待并断路器两侧是否满足准同步条件,当满足条件时发合闸脉冲,否则不发合闸脉冲。

2.3.1 整步电压

包含同步条件信息量的电压称为整步电压。自动准同步装置一般都利用整步电压来检查准同步并列条件。整步电压分为正弦整步电压和线性整步电压。

(一) 正弦整步电压

并列断路器两侧电压瞬时值之差称为滑差电压,用 u_s 表示。即

$$u_s = u_G - u_{\text{sys}} \quad (2-7)$$

令发电机电压为 $u_G = U_{Gm} \sin \omega_G t$, 系统电压为 $u_{\text{sys}} = U_{\text{sysm}} \sin \omega_{\text{sys}} t$, 当发电机电压和系统电压幅值相等时,即 $U_{Gm} = U_{\text{sysm}} = U_m$, 有

$$u_s = 2U_m \sin \frac{1}{2} \omega_s t \cos \frac{1}{2} (\omega_G + \omega_{\text{sys}}) t \quad (2-8)$$

滑差电压 u_s 波形如图 2-5 (a) 所示,将滑差电压通过图 2-5 (b) 电路整流滤波可以得到滑差电压的包络线,即正弦整步电压,用 u_{zb} 表示,波形如图 2-5 (c), 表达式为

$$u_{zb} = 2U_m \left| \sin \frac{\omega_s t}{2} \right| \quad (2-9)$$

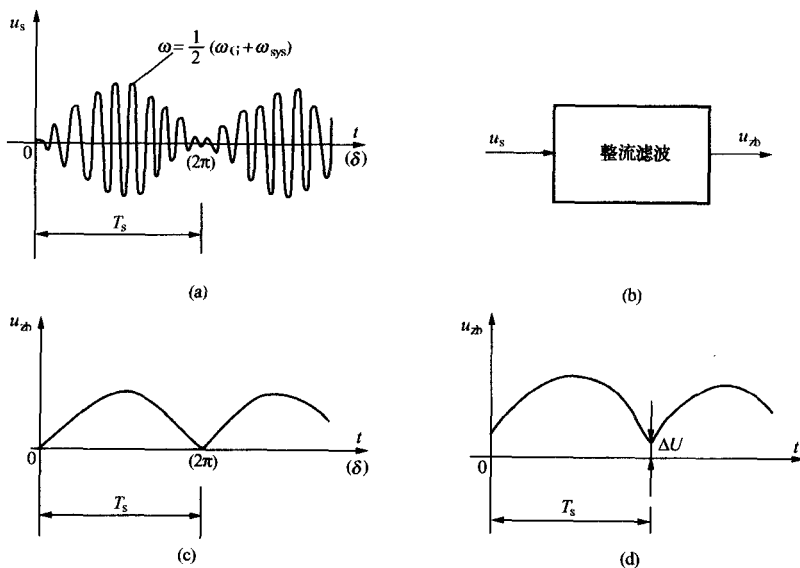


图 2-5 正弦整步电压

- (a) 滑差电压波形; (b) 整流滤波框图;
(c) 正弦整步电压波形 ($U_{Gm} = U_{\text{sysm}} = U_m$); (d) 正弦整步电压波形 ($U_{Gm} \neq U_{\text{sysm}}$)

(2) 通过测量 u_{zb} 的频率或周期可以判断频率差是否满足条件。

式中 $\omega_s t = \delta$, 所以图 2-5 (c) 中 $u_{zb} = 0$ 时刻对应 $\delta = 0^\circ$, u_{zb} 随时间变化的频率即滑差频率, 变化周期即滑差周期。

当发电机电压和系统电压幅值不相等时, 整步电压 u_{zb} 的波形如图 2-5 (d) 所示, 图中 u_{zb} 的最小值对应发电机电压与系统电压的幅值之差。

综上所述, 正弦整步电压的特点是:

(1) 通过测量 u_{zb} 的最小值可以判断电压差是否满足要求。

(3) $\delta = 0^\circ$, 整步电压出现最小值; $\delta = 180^\circ$, 整步电压出现最大值, 正弦整步电压反映相角差大小。

但是, 采用正弦整步电压实现同步条件检测的自动准同步装置, 由于 u_{zb} 与 t 是非线性关系, 在性能上不如线性整步电压实现的自动准同步装置, 故目前实际使用的自动准同步装置多采用线性整步电压。

(二) 线性整步电压

线性整步电压 u_{zb} 与时间 t 具有线性关系, 自动准同步装置中采用的线性整步电压通常为三角形, 如图 2-6 所示。

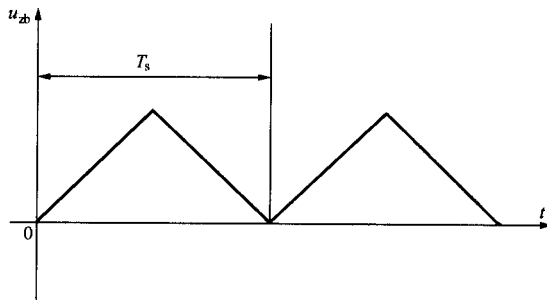


图 2-6 线性整步电压波形

此整步电压可以通过半波线性整步电压获得电路得到, 也可以通过全波线性整步电压获得电路得到。

1. 半波线性整步电压获得

图 2-7 (a) 为半波线性整步电压获得方框图, (b) 为电路图, 图中电压变换器 TV1 和 TV2 分别将系统电压 u_{sys} 和发电机电压 u_G 变成合于电子电路的电压 u_{sys1} 和 u_{G1} , 注意 u_{sys1} 与 u_{sys} 同相, u_{G1} 与 u_G 反相 [即输入到 VT1 和 VT2 的基极的电压可用 u_{sys} 和 $-u_G$ 表示, 见图 2-8 (a)]。 R_1 、V1、VT1 和 R_2 、V2、VT2 分别组成两个方波形成电路。当输入电压波形为正半周时, 晶体管饱和导通, 输出低电位; 当输入电压波形为负半周时, 晶体管截止, 输出高电位。由此将正弦波 u_{sys} 和 $-u_G$ 变成方波 $[u_{sys}]$ 和 $[-u_G]$, 如图 2-8 (b) 和 (c)。由图 2-7 (b) 可见, 只有在 VT1 和 VT2 同时截止时, a 点才为高电位, 即 VT1 和 VT2 集电极连接在一起构成高电位“与”门, 可得 a 点波形如图 2-8 (d) 所示。经过低通滤波电路可得电压 u_b , 即线性整步电压 u_{zb} 。

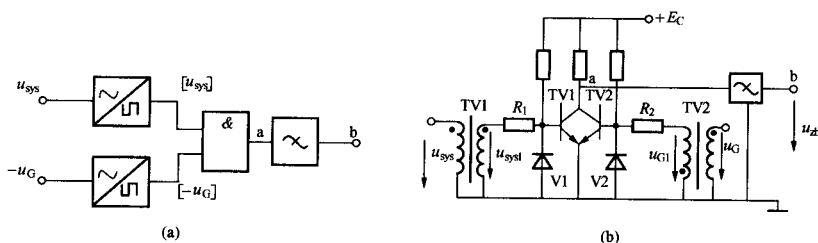


图 2-7 半波线性整步电压获得电路

(a) 方框图; (b) 电路图

注意图 2-8 (d), 对应 u_{sys} 或 $-u_G$ 一个正弦交流周期, 在 a 点只得到一个高电位脉冲。

若 u_{zb} 的最大值记为 A , 由图 2-8 (e) 可以写出半波线性整步电压的表达式为

$$u_{zb} = \begin{cases} \frac{2A}{T_s} t & \left(0 < t < \frac{T_s}{2} \right) \\ 2A \left(1 - \frac{t}{T_s} \right) & \left(\frac{T_s}{2} < t < T_s \right) \end{cases} \quad (2-10)$$

观察以上电压波形及表达式, 半波线性整步电压 u_{zb} 具有以下特点:

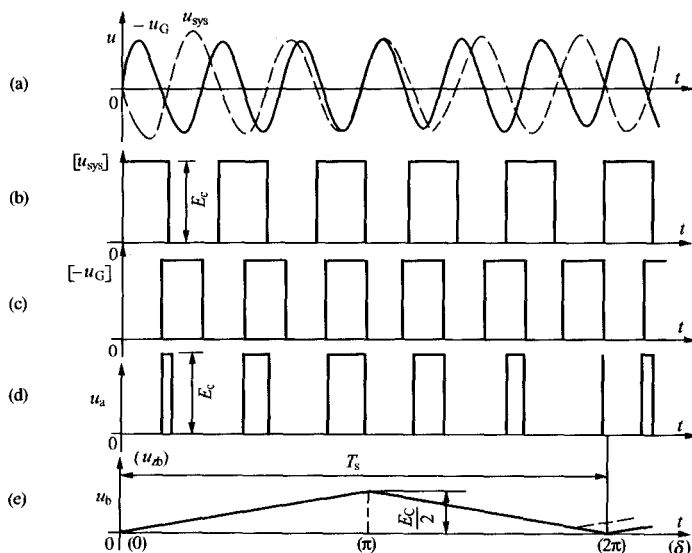


图 2-8 半波线性整步电压电路各点波形

(a) u_{sys} 和 $-u_{\text{G}}$ 波形; (b) u_{sys} 形成的方波;(c) $-u_{\text{G}}$ 形成的方波; (d) a 点波形; (e) b 点波形(5) u_{zb} 波形的斜率与频差成正比, 即:

$$\text{上升部分斜率} \quad \left. \frac{du_{\text{zb}}}{dt} \right|_{0 \sim \frac{T_s}{2}} = \frac{E_c}{T_s} = E_c |f_s| \quad (2-11)$$

$$\text{下降部分斜率} \quad \left. \frac{du_{\text{zb}}}{dt} \right|_{\frac{T_s}{2} \sim T_s} = \frac{E_c}{T_s} = E_c |f_s| \quad (2-12)$$

所以, 当 u_{zb} 在一个周期内频差不变时, 波形对称于通过 u_{zb} 最大值的垂线。

应当指出, 如果在接近 $\delta = 0^\circ$ 时出现发电机反相加速度, 则 δ 不再减小反而增大, 引起 u_{zb} 不再减小, 不能降到最小值 0V, 波形将沿图 2-8 (e) 中虚线变化。

2. 全波线性整步电压获得

图 2-9 为全波线性整步电压获得电路, 图 2-10 为各点电压波形。

u_{sys} 和 u_{G} 经过方波形成电路分别得到方波 $[u_{\text{sys}}]$ 和 $[u_{\text{G}}]$, 波形如图 2-10 (b)、(c)。由图 2-9 (b) 可见, 当 $[u_{\text{sys}}]$ 和 $[u_{\text{G}}]$ 中任意一个是高电位, 而另一个是低电位时, VT 获得基极电流而饱和导通, 输出 a 点为低电位; 只有在 $[u_{\text{sys}}]$ 和 $[u_{\text{G}}]$ 同时高电位 (u_{sys} 和 u_{G} 同时为负) 或 $[u_{\text{sys}}]$ 和 $[u_{\text{G}}]$ 同时低电位 (u_{sys} 和 u_{G} 同时为正) 时, VT 无法获得基极电流而截止, 输出 a 点才为高电位。即图 2-9 (b) 中 R_1 、 R_2 、 V_1 、 V_2 、 R_3 、VT 等构成“异或”电路 (也称全波相敏电路), 得 a 点波形如图 2-10 (d) 所示。通过低通滤波电路可得电压 u_{b} , 即线性整步电压 u_{zb} 。

注意图 2-10 (d), 对应 u_{sys} 或 u_{G} 一个正弦交流周期, 在 a 点可以得到两个高电位脉冲, 所以全波线性整步电压 u_{zb} 的最大值与 u_{a} 高电位相等, 为 E_{Δ} (不计二极管 V_3 的管压降)。由此可见, 相同条件下全波线性整步电压最大值是半波线性整步电压最大值的两倍,

(1) u_{zb} 的最大值 $A = E_c/2$ 为 u_{a} 高电位的 1/2、最小值为 0, 且都不随 u_{G} 和 u_{sys} 的大小以及频差变化, 是恒定的数值。

(2) 线性整步电压波形和顶值电压与 u_{G} 、 u_{sys} 的幅值无关, 不包含压差信息量。

(3) 方波形成电路输入电压为 u_{sys} 和 $-u_{\text{G}}$ (见图 2-7) 时, u_{zb} 的最大值对应 $\delta = 180^\circ$, u_{zb} 的最小值对应 $\delta = 0^\circ$ 或 360° ; 如果方波形成电路输入电压为 u_{sys} 和 u_{G} , 则 u_{zb} 的最大值对应 $\delta = 0^\circ$ 或 360° , u_{zb} 的最小值对应 $\delta = 180^\circ$; 所以线性整步电压包含了相角差信息量。

(4) u_{zb} 的周期即为滑差周期 T_s 。

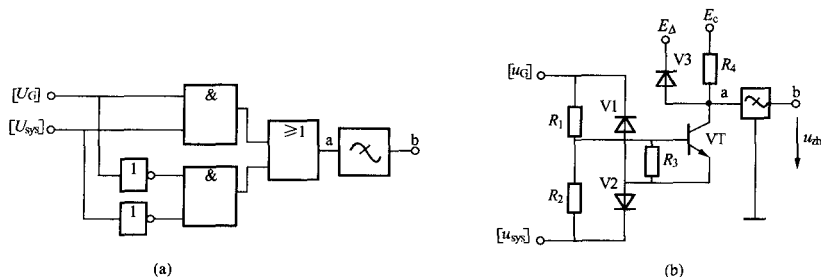


图 2-9 全波线性整步电压获得电路

(a) 方框图; (b) 电路图

并且具有更好的线性工作特性。全波线性整步电压的其他特点与半波线性整步电压类似。

若计全波线性整步电压的最大值为 E_{Δ} ，由图 2-10 (e) 可以写出全波线性整步电压的表达式

$$u_{zb} = \begin{cases} \frac{2E_{\Delta}}{T_s} t; & (0 < t < \frac{T_s}{2}) \\ 2E_{\Delta} \left(1 - \frac{t}{T_s}\right); & (\frac{T_s}{2} < t < T_s) \end{cases} \quad (2-13)$$

u_{zb} 波形的上升部分斜率

$$\frac{du_{zb}}{dt} = 2E_{\Delta} |f_s| \quad (2-14)$$

下降部分斜率

$$\frac{du_{zb}}{dt} = -2E_{\Delta} |f_s| \quad (2-15)$$

图中全波线性整步电压最大值对应 $\delta = 0^\circ$ 或 $\delta = 360^\circ$ ，最小值对应 $\delta = 180^\circ$ 。

线性整步电压通过低通滤波电路后获得，因为滤波电路存在时滞，所以实际的线性整步电压滞后于理论得到的线性整步电压，故实际的线性整步电压的最大值、最小值不与 $\delta = 0^\circ$ 或 $\delta = 360^\circ$ 、 $\delta = 180^\circ$ 对应，而是稍有滞后。

2.3.2 导前时间脉冲产生

利用线性整步电压获得恒定导前时间脉冲的方法有：

(1) 线性整步电压（最大值对应于 $\delta = 180^\circ$ ）通过比例—微分电路

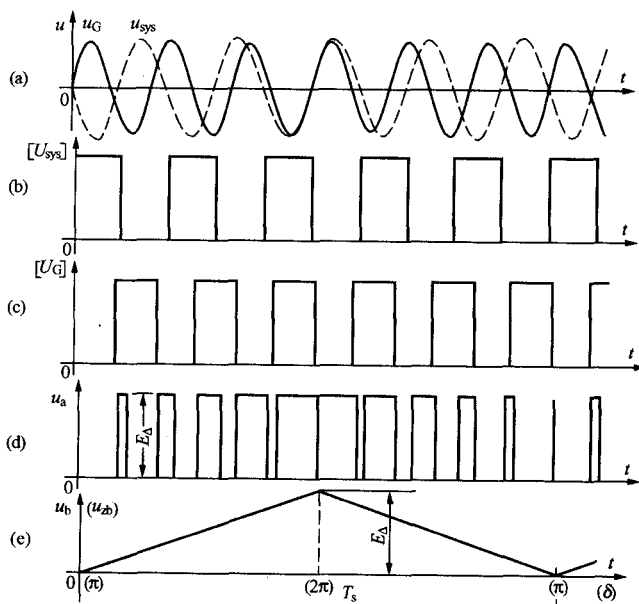


图 2-10 全波线性整步电压电路各点波形

(a) u_{sys} 和 u_G 波形; (b) u_{sys} 形成的方波;(c) u_G 形成的方波; (d) a 点波形; (e) b 点波形