



21 世纪精品教材系列

电力系统自动化

DIAN LI XI TONG ZI DONG HUA

主编◎孔祥

 吉林大学出版社

21 世纪精品教材系列

电力系统自动化

主 编 孔 祥

副主编 孙永超 李建霞 赵付章 马 涛

主 审 孙福成 吴保华



 吉林大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电力系统自动化 / 孔祥主编. — 长春: 吉林大学出版社, 2015. 1

ISBN 978-7-5677-3151-6

I. ①电… II. ①孔… III. ①电力系统—自动化
IV. ①TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 031963 号

书 名: 电力系统自动化
作 者: 孔 祥 主 编

责任编辑:李伟华 责任校对:李凤翔
吉林大学出版社出版、发行
开本:787×1092 毫米 1/16
印张:18 字数:350 千字
ISBN 978-7-5677-3151-6

封面设计:可可工作室
北京楠海印刷厂 印刷
2015 年 3 月 第 1 版
2015 年 4 月 第 1 次印刷
定价:38.00 元

版权所有 翻印必究
社址:长春市明德路 501 号 邮编:130021
发行部电话:0431-89580028/29
网址:<http://www.jlup.com.cn>
E-mail:jlup@mail.jlu.edu.cn

前 言

随着经济社会的飞速发展,电力系统自动化技术进入了一个崭新的时期。尤其是当今特高压输电、新能源发电及并网、智能电网等技术不断成熟和普及,更为电力系统自动化赋予了新的内容和意义。本书紧紧围绕电力系统自动化技术发展的实际情况,系统、全面地介绍了电力系统自动化的主要内容。

本书以电力系统自动化技术为主线,系统阐述了电力系统自动化相关理论、技术、实践与展望,力求清晰完整、严谨有序。在编写过程中吸收了国家电网公司在电力系统自动化方面的研究和工程实践中取得的一批重要成果,对于目前尚未完全成熟的理论和技術,从电力系统自动化的需要出发,进行了适度的前瞻性描述。

教材具有以下特点:

(1)先进性。本书不仅将传统的电力自动化技术中基本理论和方法讲清讲透,而且还融入了当今最新的配电网自动化、变电站综合自动化、智能电网等知识和内容。紧跟电力技术发展前沿,切实做到了知识与时代同行,保证教材内容的先进性和前瞻性。

(2)适用性。在讲述基本理论和方法时,尽量做到原理叙述完整,公式推演清楚,既有理解分析,又有例题验证,利于培养和训练相关人员分析问题和解决问题的能力以及开拓创新能力,且便于自学,使那些没有机会进入课堂听讲的人也能看懂。

本书由孔祥任主编,甘肃畜牧工程职业技术学院孙福成副教授和国家电网甘南供电公司吴保华副总工程师担任主审。参加编写的有:甘肃畜牧工程职业技术学院孔祥(第一、六、七、八章)、甘肃畜牧工程职业技术学院孙永超(第二章)、甘肃畜牧工程职业技术学院李建霞(第三、四章、五章)、国家电网甘南供电公司、注册电气工程师赵付章(第九、十、十一章)、中国能源建设集团甘肃省电力设计院马涛(第十二章)。此外,本书编写过程中,曾得到许多单位的热忱支持,并提供大量的资料和有益的建议,在此一并感谢!

电力系统自动化技术是一个渐进的过程,本书仅是对现有研究和实践成果的总结,电力技术和自动化技术的深入发展,必将会有大量的新技术不断涌现,需要我们密切跟踪和深入研究。

由于编写时间仓促,疏漏之处在所难免,敬请批评指正。

编者
2015年2月



目 录

第一章 发电机的自动并列	(1)
第一节 概 述	(1)
第二节 准同期并列的基本原理	(6)
第三节 恒定越前时间并列装置	(12)
第四节 数字式并列装置	(19)
第二章 同步发电机的自动励磁控制系统	(31)
第一节 概 述	(31)
第二节 同步发电机励磁系统	(36)
第三节 励磁系统中的流整电路	(42)
第四节 励磁调节装置的基本原理	(47)
第五节 同步发电机的强行励磁和灭磁	(50)
第三章 电力系统频率及有功功率的自动控制	(53)
第一节 电力系统频率和有功功率控制的必要性	(53)
第二节 电力系统的频率特性	(55)
第三节 电力系统的频率调整	(60)
第四节 有功功率平衡与火电厂间负荷的最优分配	(68)
第五节 电力系统低频减载	(73)
第四章 电力系统的电压调整和无功功率控制技术	(77)
第一节 电力系统电压控制的意义	(77)
第二节 电力系统无功功率平衡与电压的关系	(82)
第三节 电力系统电压控制的措施	(89)
第四节 电力系统电压的综合控制	(98)



第五节 电力系统无功功率电源的最优控制	(104)
第五章 电力系统调度自动化	(108)
第一节 我国电网调度分层结构	(108)
第二节 电网调度信息	(109)
第三节 电力系统远动及调度自动化系统	(110)
第六章 配电网自动化	(128)
第一节 配电网自动化简介	(128)
第二节 馈线自动化	(132)
第三节 变电站自动化	(137)
第四节 用户服务自动化	(140)
第五节 配电管理自动化	(142)
第六节 配电网的通信系统	(143)
第七章 变电站综合自动化	(151)
第一节 变电站综合自动化概述	(151)
第二节 数据通信	(162)
第三节 变电站综合自动化的微机保护	(165)
第四节 变电站微机故障处理、辅助功能	(170)
第八章 智能电网	(174)
第一节 智能电网概述	(174)
第二节 智能电网的发展	(177)
第三节 智能电网基础技术	(185)
第九章 智能变电站	(191)
第一节 智能化变电站的概念	(191)
第二节 智能变电站关键技术和设备的应用	(197)
第三节 智能变电站模式	(214)
第十章 大规模新能源发电及并网技术	(221)
第一节 大规模新能源发电	(221)
第二节 新能源与储能技术	(230)
第三节 大规模新能源接入与控制	(242)
第四节 新能源优化调度	(246)



第十一章 分布式发电	(254)
第一节 分布式发电的基本概念	(254)
第二节 发展分布式发电的意义	(256)
第三节 分布式发电技术	(257)
第四节 分布式发电与并网技术	(263)
第五节 分布式发电技术的研发重点与应用前景	(269)
第十二章 微 电 网	(273)
第一节 微电网基本设备和技术	(273)
第二节 微电网结构	(274)
第三节 微电网的控制和保护	(276)
第四节 微电网的运行	(277)
第五节 微电网的能量管理系统	(278)



第一章 发电机的自动并列

第一节 概 述

一、并列操作的意义及基本要求

电力系统并列运行前任一母线电压瞬时值为

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1-1)$$

式中, U_m ——电压幅值;

ω ——电压的角速度;

φ ——初相角。

式(1-1)表示了电网运行中该母线电压的幅值、频率和相角。这三个重要参数常被指定为运行母线电压的状态量,电网的电压也常用相量 \dot{U} 来表示。

如图 1-1(a)所示,一台发电机组在未并入系统运行之前,它的电压 U_G 与并列母线电压 U_x 的状态量往往不等,须对待发电机组进行适当的操作,使之符合并列条件后才允许断路器 QF 合闸作并网运行,这一系列操作称为并列操作,有时也称为“并车”/“并网”等。

随着负荷的波动,电力系统中运行的发电机组台数也经常要变动。因此,同步发电机的并列操作是电厂的一项重要操作。另外,当系统发生某些事故时,也常要求将备用发电机组迅速投入电网运行。可见,在电力系统运行中,并列操作是较为频繁的。

电力系统的容量在不断增大,同步发电机的单机容量也越来越大,大型机组不恰当的并列操作将导致严重后果。因此,对同步的并列操作进行研究,提高并列操作的准确度和可靠性,对于系统的可靠运行具有很大的实际意义。

同步发电机组并列的基本要求是:

(1) 并列断路器合闸时,冲击电流不超过允许值,且尽可能地小。

(2) 发电机组并入电网后,应能迅速进入同步运行状态,其暂态过程要短,以减少对电力系统干扰。

所谓冲击电流是指并列断路器合闸时通过断路器主触点的电流。一般情况下冲击电流幅值较高而持续时间较短。发电机并列时冲击电流会在定子绕组中产生电动力,其



值与冲击电流的平方成正比。冲击电流太大时,过大的电动力可能造成定子绕组的损坏,如定子绕组端部断开等。过大的冲击电流还可能造成电力系统中其他设备损坏或电力系统振荡。

同步发电机的并列方法可分为准同期并列和自同期并列两种。本章主要介绍准同期并列方法,自同期并列方法已很少采用,本书只介绍它的一般原理。

二、准同期并列

待并发电机组 G 已经加上了励磁电流,其端电压为 \dot{U}_G ,调节待并发电机组 \dot{U}_G 的状态参数使之符合并列条件并将发电机并入系统的操作,称为准同期并列。如图 1-1(a)所示, QF 为并列断路器, QF 的另一侧为电网电压 \dot{U}_X ;并列断路器合闸之前, QF 两侧电压的状态量一般不相等,须对发电机组 G 进行控制使它符合并列条件,然后发出 QF 的合闸信号。这里需要注意的是,发电机三相电压 \dot{U}_A 、 \dot{U}_B 、 \dot{U}_C 与系统三相电压的相序要相同。这在新投运机组的并列操作时特别重要。

由于 QF 两侧电压的状态量不等, QF 主触点具有电压差 \dot{U}_s ,其值可由电压相量图图 1-1(b)的求得。

设发电机电压 \dot{U}_G 的角频率为 ω_G ,电网电压 \dot{U}_X 的角频率为 ω_X ,它们之间的相量差 $\dot{U}_G - \dot{U}_X = \dot{U}_s$ 。如图 1-(c)是计算并列时冲击电流的等值电路。当电网参数一定时,冲击电流的大小决定于合闸瞬间的 \dot{U}_s 的值。要求 QF 合闸瞬间的 \dot{U}_s 应尽可能地小,其最大值应使冲击电流不大于允许值。最理想的情况是 \dot{U}_s 值等于零,这时 QF 合闸的冲击电流就等于零;并希望并列后能够顺利进入同步运行状态,对电网无任何扰动。

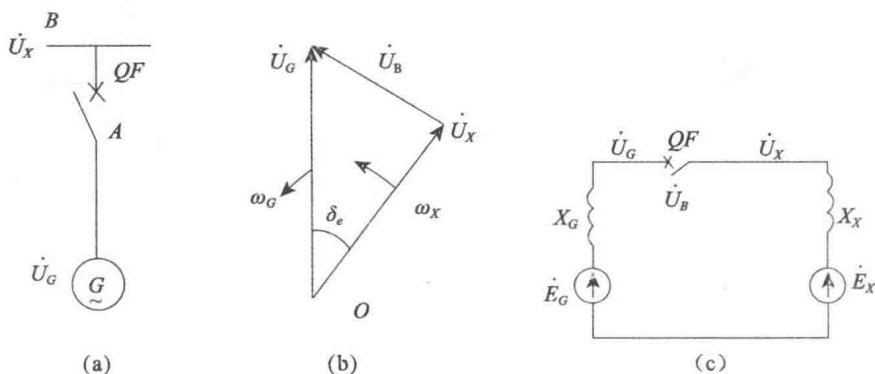


图 1-1 准同期并列

(a) 电路示意图 (b) 相量图 (c) 等效电路图

综上所述,发电机并列的理想条件为并列断路器两侧电压的三个状态量全部相等,



图 1-2(b)中的 \dot{U}_G, \dot{U}_X 两个相量完全重合并且同步旋转。所以并列的理想条件可表达为

$$f_G = f_X, \omega_G = \omega_X, (\omega_G = 2\pi f_G, \omega_X = 2\pi f_X) \text{ 即频率相等,}$$

$$U_G = U_X, U_S = U_G - U_X = 0, \text{ 即电压幅值相等,}$$

$$\delta_G = \delta_X, \delta_e = \delta_G - \delta_X = 0, \text{ 即相角差等于零。} \quad (1-2)$$

这时并列合闸的冲击电流等于零,并且并列后发电机 G 与电网立即进入同步运行,不发生任何扰动。

如果待并发电机的调速器和调压器能按式(1-2)进行调节,实现理想的并列操作,则可极大地简化并列过程。但在实际运行中,待并发电机组的调节系统并不能满足理想的调节条件,即这三个条件很难同时满足。其实,在实际操作中也没有这样苛求的必要。因为并列合闸时只要冲击电流较小,不危及电气设备,合闸后发电机组就能迅速进入同步运行,对待并发电机和电网运行的影响较小,不会引起任何不良后果。

因为,准同期并列很难使三个条件同时成立而存在一定的误差。下面就来分析一下电压幅值差、频率差和相角差对并列产生的影响。为了便于分析,假设三个条件中有两个条件同时满足,只有一个条件不满足。

1. 电压幅值差

设图 1-2(a)所示是发电机并列时的电压相量,即并列时:① $f_G = f_X$, ② $\delta_e = \delta_G - \delta_X = 0$, ③ $U_G \neq U_X$ 。在上述条件下,冲击电流最大瞬值为

$$I''_{h \cdot \max} = \frac{1.8\sqrt{2}(U_G - U_X)}{X''_p + X_X} \quad (1-3)$$

式中, U_G, U_X ——发电机电压、电网电压有效值;

X''_p ——发电机交轴次暂态电抗;

X_X ——电力系统等值电抗。

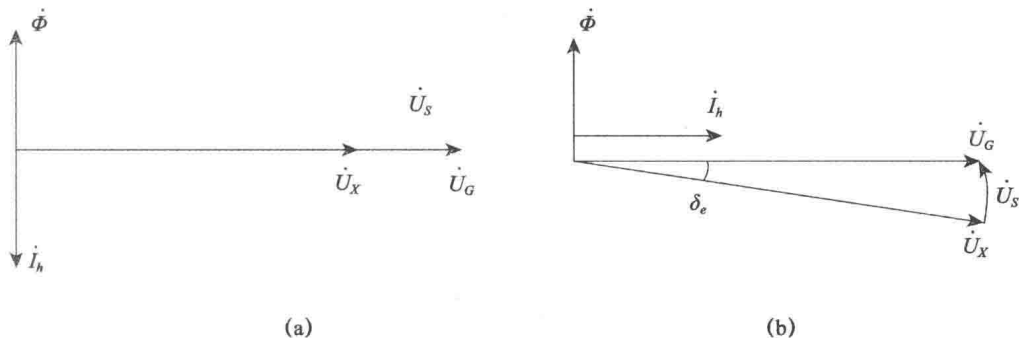


图 1-2 准同期条件分析

(a) $\delta_e = 0$ 时的相量图 (b) $\delta_e \neq 0$ 时的相量图

从图 1-2(a)可见,当 δ_e 很小时,可认为 \dot{I}_h 滞后电压 \dot{U}_S 90° ,所以只存在电压幅值差的情况下,并列机组产生的冲击电流 \dot{I}_h 主要为无功冲击电流。



2. 合闸相角差角

设并列合闸时,断路器两侧电压相量关系如图 1-2(b)所示,即:① $f_G = f_X$;② $\delta_e = \delta_G - \delta_X \neq 0$;③ $U_G = U_X$ 。这种情况发电机为空载运行,电动势即为端电压,并与电网电压相等,冲击电流的最大瞬时值

$$I''_q \cdot \max = \frac{2.55U_X}{X''_q} \cdot 2 \sin \frac{\delta_e}{2} \quad (1-4)$$

式中, U_X ——系统电压有效值;

X''_q ——发电机交轴次暂态电抗。

从图 1-2(b)可见,由于并列时 δ_e 一般都很小, \dot{I}_h 与 \dot{U}_S 基本同相位,所以由电压幅值差产生的冲击电流 \dot{I}_h 主要是有功电流分量。说明合闸后发电机立刻向电网输出有功功率,使机组联轴受到突然冲击,这对机组和电网运行都是不利的。为了保证机组安全,一般将有功冲击电流限制在较小数值以内。

设待并发电机电压与电网电压之差为 \dot{U}_S 。如果 \dot{U}_G 与 \dot{U}_X 之间既存在幅值差,又存在相角差,这时 \dot{U}_S 所产生的冲击电流可综合以上两种典型情况进行分析。

3. 频率不相等

(1) 频差、滑差、滑差周期

待并发电机的电压相量关系如图 1-3 所示,分析的条件有 $U_G = U_X$; $\delta_e = \delta_G - \delta_X = 0$; $f_G \neq f_X$, 即两者的频率差是一项很重要的参数,用 f_s 表示频差,即 $f_s = f_G - f_X$ 。

当两个交流电压的频率不相等(但较接近)时,通常可用两个有相对旋转速度的相量来表示,如图 1-3。两个交流电压 \dot{U}_G 、 \dot{U}_X 间的瞬时相角差 δ_e 就是图中两个电压相量间的夹角;两电压相量同方向旋转,一慢一快,两者间的电角频率差称为滑差角频率,称为滑差,用 ω_s 表示。于是得 $\omega_s = \omega_G - \omega_X$ 。很显然 ω_s 是有正负值,其方向与所规定的参考相量有关。图 1-3 中以系统电压 \dot{U}_G 为参考相量,于是当 $\omega_s > \omega_G$ 时, $\omega_s < 0$; 当 $\omega_s < \omega_X$ 时, $\omega_s > 0$ 。相反,若以 \dot{U}_X 为参考相量,则 ω_s 的方向恰好相反。

滑差周期为 $T_s = \frac{2\pi}{|\omega_s|} = \frac{1}{|f_s|}$ 。可见频差 f_s 、滑差 ω_s 与滑差周期 T_s 是可以相互换算的,它们是反映两电压相量相对运动快慢的一组数据。

频差 f_s 、滑差 ω_s 、与滑差周期 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,需要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”,而加速或减速的力矩会对机组造成冲击,而显然,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 10~16 s 之间。



(2) 频率不相等对待并列发电机组的影响

图 1-4 是待并列发电机组进入同步运行的暂态过程分析示意图。

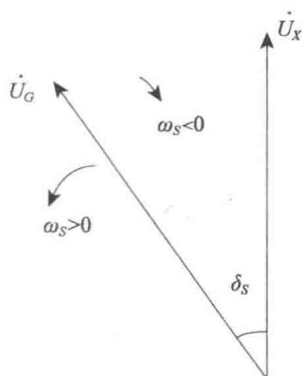


图 1-3 滑差电压原理图

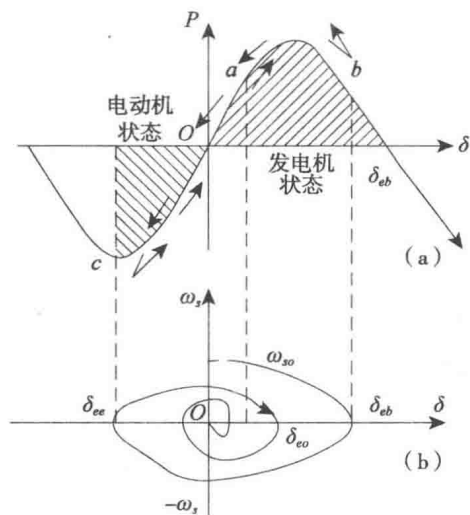


图 1-4 并列的同步过程分析

当发电机组与电网间进行有功功率交换时,如果发电机的电压 \dot{U}_G 超前电网电压 \dot{U}_X ,发电机发出功率,则发电机将被制动而减速。反之,当 \dot{U}_G 滞后 \dot{U}_X 时,发电机吸收功率,则发电机将被加速。所以交换功率的方向与相角差 δ_e 的正负有关。

我们定义发电机发出功率为“发电机状态”,发电机吸收功率为“电动机状态”。设原动机的输入功率恒定不变,且 $\omega_G > \omega_X$ 。若合闸时的相角差为 δ_{e0} ,此时的滑差为 ω_{s0} (图中 a 点),并为超前情况,则合闸后发电机处于“发电机状态”而受到制动, ω_G 开始减小。发电机功率沿功角特性到达 b 点时, $\omega_G = \omega_x$,但这时 δ_e 达到最大。由于发电机仍处于“发电机状态”,所以 ω_G 继续减小, δ_e 也逐渐减小,发电机功率沿特性曲线往回摆动。到达坐标原点时,电压相量 \dot{U}_G 与 \dot{U}_X 重合(图 1-3),相角差 δ_e 为零,但 $\omega_G < \omega_X$;过原点后,相角差 δ_e 开始变负,交换功率变负,发电机组处于“电动机状态”,又重新加速,即 ω_G 又开始增加。当交换功率沿功角特性变动到 $\omega_G = \omega_X$ (图中的 c 点),相角差 δ_e 达到滞后方向最大值。在加速力矩作用下 ω_G 继续增大,负的 δ_e 减小, ω_G 增大,重复前面的过程,由于阻尼等因素的影响,摆动的幅度逐渐减小直到进入同步运行为止。

显然,进入同步状态的暂态过程与合闸时滑差角 ω_{s0} 的大小有关。当 ω_{s0} 较小时,到达最大相角 b 点时的 ω_b 也较小,可以很快进入同步运行。当 ω_{s0} 较大时,如图 1-4 所示,则需经历较长时间振荡才能进入同步运行(如果 ω_{s0} 很大, b 点超出 180° ,则将导致失步)。所以滑差大,暂态过程长;滑差小,暂态过程小。

三、自同期并列

自同期并列操作是将一台未加励磁电流的发电机组升速到接近与电网频率,在滑差



角频率 ω_s 不超过允许值,且机组的加速度小于某一给定值得条件下,首先合上并列断路器 QF ,接着立刻合上励磁开关 KE ,给发电机转子绕组加励磁电流,发电机电势逐渐增加、冲击电流逐渐减小的过程中被电力系统将并列的发电机组拉入同步运行。

自同期并列最突出的优点是操作非常简单、并列迅速、易于实现自动化。在电力系统发生事故频率波动较大的情况下,应用自同期并列可以把备用机组投入电网运行,所以广泛应用于水轮发电机组,作为处理系统事故的重要办法之一。

自同期并列方式不能用于两个系统间的并列操作,同时,当发电机以自同期方式投入电网时,在投入瞬间,无励磁的发电机接入电网,相当于电网经发电机次暂态电抗短路,因而不可避免地要出现较大的冲击电流。

当机组一定时,自同期并列的冲击电流主要取决于系统的情况,即决定于系统电压 U_x 和系统电抗 X_x ,自同期时发电机的端电压值 U_G 与冲击电流成正比。

自同期并列的缺点是冲击电流大,对电力系统扰动大,不仅会引起电力系统频率振荡,而且会在自同期并列的机组附近造成电压瞬时下降。

综合考虑自同期并列的优缺点,它只能在电力系统发生事故且频率较低时使用。现代电力系统的趋势之一是采用大容量机组,而大容量机组自同期并列对系统扰动大。同时,自同期并列容易造成机组损坏,所以自同期并列方法现已很少采用。

第二节 准同期并列的基本原理

在满足并列条件的情况下,采用准同期并列方法将待并发电机组投入电网运行,只要控制得当,就可使冲击电流很小,且对电网扰动很小。所以准同期并列是电力系统运行中的主要并列方式。

设并列断路器 QF 两侧电压分别为 \dot{U}_G 和 \dot{U}_x ;并列断路器 QF 主触头闭合瞬间所出现的冲击电值以及进入同步运行的暂态过程,决定于合闸时的电压差 \dot{U}_s (实为脉动电压)和滑差角频率 ω_s 。因此,准同期并列主要是对脉动电压 \dot{U}_s 和滑差角速度 ω_s 进行检测和控制,并选择合适的时间发出合闸信号,使合闸瞬间的 \dot{U}_s 值在允许值以内。检测的信息也就取自 QF 两侧的电压,而且主要是对 \dot{U}_s 进行检测并提取信息。现对脉动电压的变化规律进行分析。

一、脉动电压

(一) \dot{U}_G 和 \dot{U}_x 两电压幅值相等

为了便于分析问题,设待并发电机电压 \dot{U}_G 与电网电压 \dot{U}_x 的幅值相等,而 $\omega_G \neq \omega_x$ 。



因此, U_G 与 U_X 是作相对运动的两个电压相量。这时断路器 QF 两侧间的电压差 u_s 为

$$\begin{aligned} u_G &= U_G \sin(\omega_G t + \varphi_G) \\ u_X &= U_X \sin(\omega_X t + \varphi_X) \\ u_s &= u_G - u_X \end{aligned}$$

设初相角 $\varphi_G = \varphi_X = 0$, 并应用和差化积公式得

$$u_s = u_G - u_X = 2U_G \sin\left(\frac{\omega_G - \omega_X}{2}t\right) \cos\left(\frac{\omega_G + \omega_X}{2}t\right) \quad (1-5)$$

令 $u_s = 2U_G \sin\left(\frac{\omega_G - \omega_X}{2}t\right)$ 为脉动电压 u_s 的幅值, 则

$$u_s = U_s \cos\left(\frac{\omega_G - \omega_X}{2}t\right) \quad (1-6)$$

从(1-6)可知, u_s 波形可以看成是幅值为 U_s , 频率接近于工频的交流电压波形。 $\omega_s = \omega_G - \omega_X = 2\pi f_s$, 为滑差角频率。两电压相量间的相角差为

$$\delta_e = \omega_s t \quad (1-7)$$

$$U_s = 2U_s \sin \frac{\omega_s t}{2} = 2U_G \sin \frac{\delta_e}{2} = 2U_X \sin \frac{\delta_e}{2} \quad (1-8)$$

由此可见, U_s 为正弦脉动波, 所以 U_s 又称为脉动电压, 其最大幅值为 $2U_G$ (或 $2U_X$)。 \dot{U}_s 的相量图及其瞬时值波形如图 1-5 所示。如用相量分析, 则可设想系统电压 \dot{U}_X 不变, 而待并发电机的电压 \dot{U}_G 以滑差角频率 ω_s 对 \dot{U}_X 转动。当相角差 δ_e 从 $0 \sim \pi$ 变动时, \dot{U}_s 的幅值相应地从零变到最大值 $2U_G$; 当 δ_e 从 $\pi \sim 2\pi$ (重合) 变动时, \dot{U}_s 的幅值又从最大值变到零。相角差 δ_e 变动 2π 的时间称为脉动周期 T_s 。

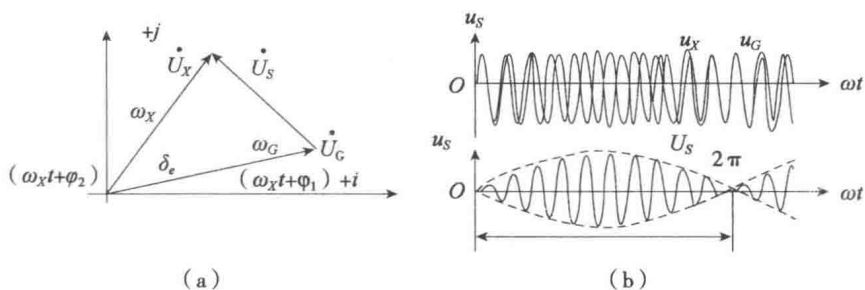


图 1-5 脉动电压

(a) 相量图 (b) 波形图

(二) U_G 和 U_X 两电压幅值不相等

若并列断路器 QF 两侧的电压幅值不相等, 由图 1-1(b) 的相量图, 应用三角公式可求得 U_s 的值为

$$U_s = \sqrt{U_X^2 + U_G^2 - 2U_G U_X \cos \omega_s t} \quad (1-9)$$

当 $\omega_s t = 0$ 时, 以 $U_s = |U_G - U_X|$ 为两电压幅值差;



当 $\omega_s = \pi$ 时, $U_s = U_G + U_X$ 为两电压幅值和。

两电压幅值不等时, 电压 U_s 波形如图 1-7 所示。因为脉动周期 T_s 只与 ω_s 有关, 所以图 1-7 中的脉动电压周期 T_s 表达得与图 1-6 相同。

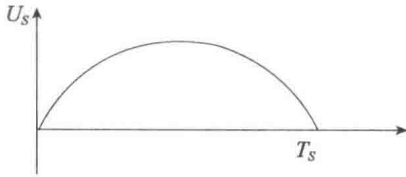


图 1-6 $U_G = U_X$ 时 U_s 波形

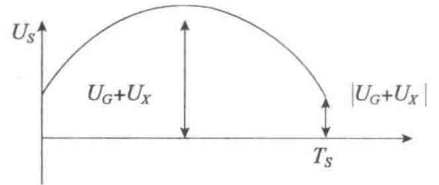


图 1-7 $U_G \neq U_X$ 时 U_s 波形

(三) 利用脉动电压 U_s 检测准同期并列的条件

图 1-6 和图 1-7 表明, 在脉动电压 U_s 的波形中载有准同期并列所需检测的所有信息包括电压幅值差、频率差及相角差随时间的变化规律, 因而可以利用它为自动并列装置提供鉴别并列条件的信息, 以及选择合适的合闸信号的发出时间。脉动电压 U_s 合适有时也称作滑差电压。

1. 电压幅值差

电压幅值差 $|U_G - U_X|$ 为对应于脉动电压 U_s 波形的最小幅值, 由图 1-7 得

$$U_s \min = |U_G - U_X|$$

通过对 $U_s \min$ 的测量, 就可判断 U_G 与 U_X 间的电压幅值差是否超出允许值。

2. 频率差

U_G 与 U_X 间的频率差就是脉动电压 U_s 的频率 f_s , 它与滑差角频率 ω_s 的关系如下式所示

$$\omega_s = 2\pi f_s$$

可见 ω_s 反映了频率差 f_s 的大小。要求 ω_s 小于某一允许值, 就相当于要求脉动电压周期 T_s 大于某一个给定值。

3. 合闸相角差 δ_c 的控制

前面已经说明了, 最理想的合闸瞬间是在 \dot{U}_G 与 \dot{U}_X 两电压相量重合的瞬间。考虑到断路器操动机构和合闸回路控制电器的固有动作时间, 必须在两电压相量重合之前发出合闸信号, 即取一提前量。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的合闸时间(准同期装置的动作时间可忽略)进行整定, 整定值和滑差及压差无关, 故称其为“恒定越前时间”。

二、自动准同期装置

为了使待并发电机组满足并列条件, 自动准同期装置设置了三个控制单元。

(1) 频率差控制单元。它的主要功能是检测 \dot{U}_G 与 \dot{U}_X 间的滑差角频率 ω_s , 并且调节

发电机转速,使发电机电压的频率接近于系统频率。

(2)电压差控制单元。它的功能是检测 \dot{U}_G 与 \dot{U}_X 间的电压差,并调节发电机电压 \dot{U}_G ,使它与 \dot{U}_X 间的电压差小于规定的允许值,促进并列条件的形成。

(3)合闸信号控制单元。检查并列条件,当待并机组的频率和电压都满足并列条件时,合闸控制单元就选择合适的时间,即在相角差 $\delta_0 = 0$ 的时刻,提前一个“恒定越前时间”发出合闸信号。

自动准同期装置的组成可用图 1-8 表示。同步发电机的准同期并列装置按自动化程度分为:

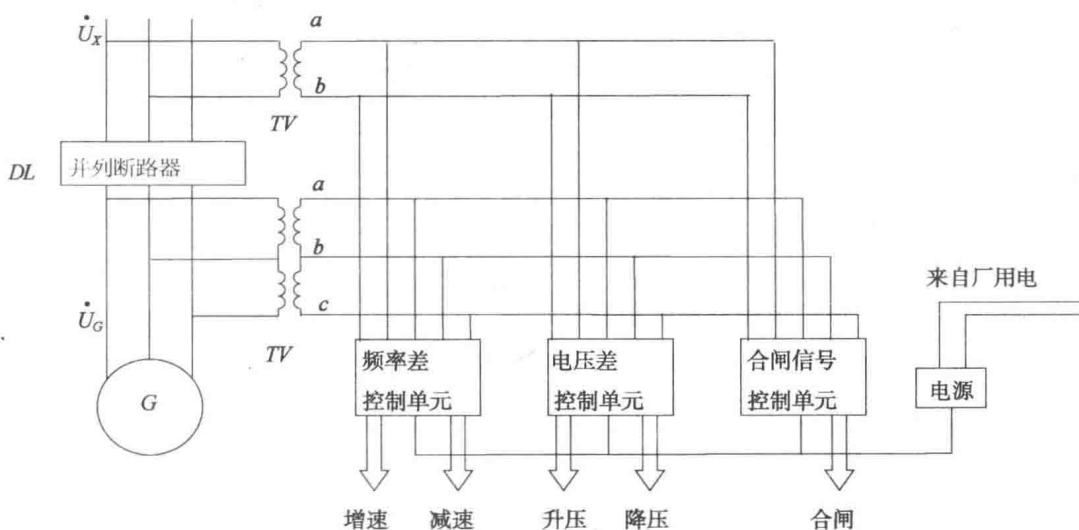


图 1-8. 自动准同期并列装置组成

(1)半自动准同期并列装置。这种并列装置无频差调节和电压调节功能,只有合闸信号控制单元。并列时,待并发电机的频率和电压由运行人员监视和调整,当频率和电压都满足并列条件时,并列装置就会在合适的时间发出合闸信号。它与手动并列的区别仅仅是合闸经判断后自动发出,而不是由运行人员手动发出。

(2)自动准同期并列装置。如图 1-8 所示,其中设置了频率差控制单元、电压差控制单元和合闸信号控制单元。当同步发电机并列时,发电机的频率和电压都由并列装置自动调节,使它与电网的频率、电压间的差值减小。当满足并列条件时,自动选择合适时机发出合闸信号。

三、准同期并列合闸信号的控制

在准同期并列操作中,合闸信号控制单元是准同期并列装置的核心部件,所以准同期并列装置原理也往往是指该控制单元的原理。其控制原则是当频率和电压都满足并



列条件的情况下,在 \dot{U}_G 与 \dot{U}_X 要重合之前发出合闸信号。在两电压相量重合之前的信号称为提前量信号,装置的逻辑结构框图如图 1-9 所示。

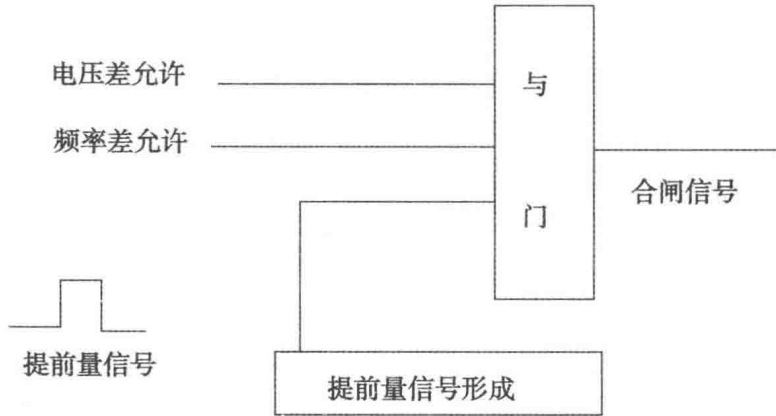


图 1-9 准同期并列合闸信号控制逻辑结构图

1. 越前时间 t_{YJ}

越前时间 t_{YJ} 采用的提前量为恒定时间信号,即在脉动电压 U_s 到达两电压相量重合 ($\delta_e=0$) 之前 t_{YJ} 发出合闸信号,一般取 t_{YJ} 等于断路器的合闸时间 t_c 和自动准同期装置的动作时间 t_{QF} 的和,因此采用恒定越前时间的并列装置,理论上可以使合闸相角差 δ_e 等于零。

$$t_{YJ} = t_c + t_{QF} \tag{1-10}$$

公式中 t_{QF} ——自动准同期装置的动作时间;

t_c ——并列断路器的合闸时间。

应当指出, t_{YJ} 主要决定于 t_{QF} , 其值随断路器的类型而不同。所以装置中的 t_{YJ} 应便于整定,以适应不同断路器的需要。

2. 允许滑差角速度

在 $\delta_e=0$ 之前的恒定时间 t_{YJ} 发出合闸信号,它对应的越前相角 δ_{YJ} 的值是随 ω_s 而变化的,其变化规律如图 1-10 所示。

由于 $\delta_{YJ} = \omega_s t_{YJ}$, 当 t_{YJ} 为定值时,发出合闸脉冲时的越前相角与 ω_s 成正比,即由于

$$\begin{aligned} \omega_{S1} > \omega_{S2} > \omega_{S3}, \text{ 所以} \\ \delta_{YJ1} > \delta_{YJ2} > \delta_{YJ3} \end{aligned}$$

虽然从理论上讲,按恒定越前时间原理工作的自动并列装置可以使合闸相角差 δ_e 等于零,但实际上,由于装置的越前信号时间、继电器的动作时间以及断路器的合闸时间 t_{QF} 存在着分散性,因而并列时仍难免具有合闸相角误差,这就使并列时的允许滑差角速