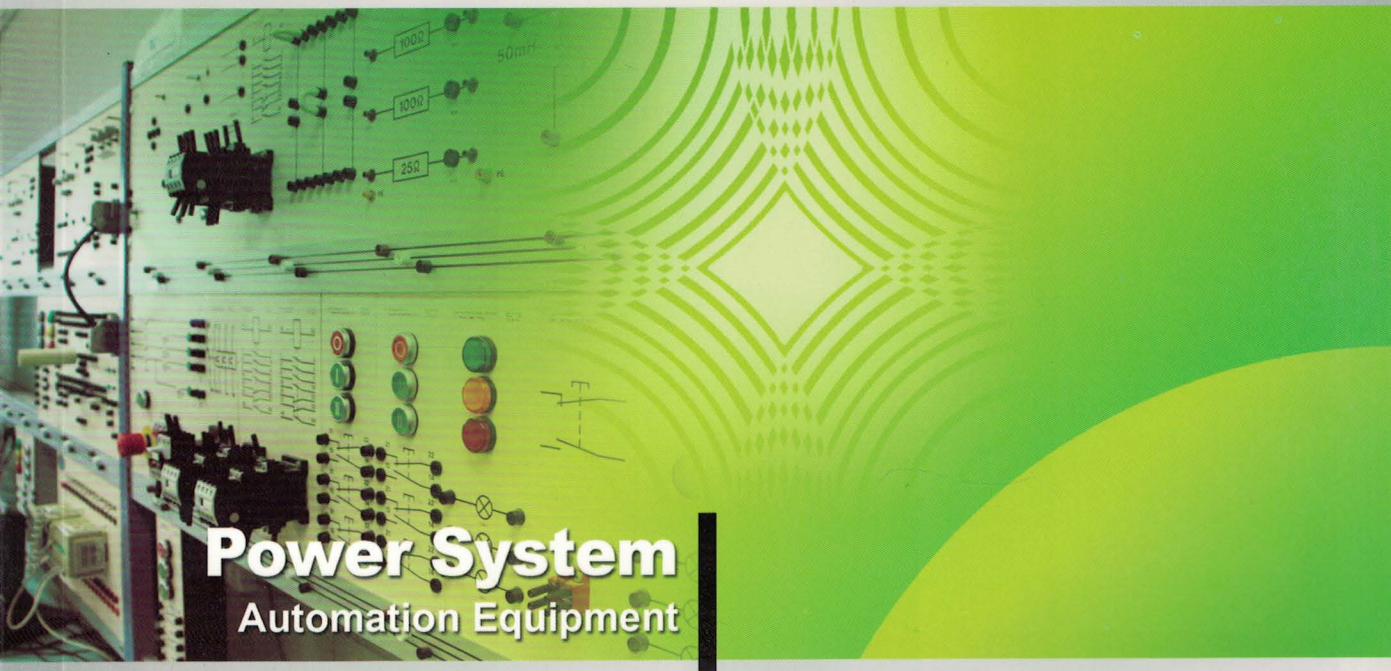
普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十三五”规划教材



Power System
Automation Equipment

电力系统自动装置

第2版

◎ 主编　李凤荣　武晓冬

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

需要全本请访问 www.ertongbook.com

普通高等教育电气工程与自动化（应用型）“十三五”规划教材

电力系统自动装置

第 2 版

主　编　李凤荣　武晓冬
参　编　马丽英　李晋民
主　审　商立群

机 械 工 业 出 版 社

本书根据电力系统自动装置的教学要求，结合我国目前电力系统自动化技术的发展，重点讲述了电力系统自动装置的工作原理和实际应用。全书共分为七章，主要内容包括同步发电机的自动并列、电力系统电压的自动调节、电力系统频率及有功功率的自动调节、电力系统自动化技术概论、输电线路的自动重合闸装置、电力系统自动低频减载装置及其他安全自动装置，同时在每章后附有复习思考题。

本书主要作为普通高等学校电力工程类专业的教材，也适用于成人高等教育和高职高专院校，同时也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

电力系统自动装置/李凤荣，武晓冬主编．—2 版．—北京：机械工业出版社，2017.9

普通高等教育电气工程与自动化（应用型）“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-57929-8

Ⅰ．①电… Ⅱ．①李… ②武… Ⅲ．①电力系统-自动装置-高等学校-教材 Ⅳ．①TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 216537 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：王雅新 责任编辑：王雅新 刘丽敏

责任校对：佟瑞鑫 封面设计：张 静

责任印制：李 昂

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2017 年 10 月第 2 版第 1 次印刷

184mm×260mm · 11.5 印张 · 278 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-57929-8

定价：29.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线：010-88379833

读者购书热线：010-88379649

网络服务

机 工 官 网：www.cmpbook.com

机 工 官 博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

金 书 网：www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

普通高等教育电气工程与自动化（应用型）“十三五”规划教材

编审委员会委员名单

主 任 委 员：刘国荣

副主任委员：

张德江　梁景凯　张　元　袁德成　焦　斌

吕　进　胡国文　刘启中　汤天浩　黄家善

钱　平　王保家

委　　员（按姓氏拼音排序）：

蔡子亮　陈志新　丁元明　范立南　樊立萍

高　亮　郭　伟　韩成浩　李海富　李先允

李秀娟　娄国焕　罗　兵　罗文广　罗印升

马修水　穆向阳　尚丽萍　王　军　王再英

项新建　徐建英　杨　宁　叶树江　张立臣

张晓云　赵巧娥　周渊深　朱一纶

前　言

随着电力系统规模的不断扩大，电力系统的结构和运行方式变得越来越复杂，对电力系统自动控制技术的要求也越来越高。电力系统自动装置在经历了电磁型、整流型、集成电路型之后，已经全面进入微机型自动装置时代。因此，在本书的内容组织中，既阐明了电力系统自动装置的基本原理、运行特性，又介绍了微机型自动装置的特点及实现方法，并注重新原理、新技术的采用，以及目前电力系统自动化技术的应用和作用。在编写过程中，本着理论联系实际的原则，力求简单实用和通俗易懂，尽量避免复杂的公式推导，对具体的自动装置不做过于细致的动作过程分析，因此可读性较强，既可作为普通高等学校电力工程类专业的教材，也适用于成人高等教育和高职高专院校，同时也可供相关工程技术人员参考。

本书共分为七章，其中第一章为同步发电机的自动并列，由李凤荣编写；第二章为电力系统电压的自动调节，第三章为电力系统频率及有功功率的自动调节，第四章为电力系统自动化技术概论，由武晓冬编写；第五章为自动重合闸，由李晋民编写；第六章为电力系统自动低频减载装置，由马丽英编写；第七章为电力系统其他安全自动装置，其中的备用电源自动投入装置由马丽英编写，厂用电切换、自动解列及故障录波装置由李凤荣编写。

本书在编写过程中，参考了本领域许多著作及相关技术资料，得到了各方面的支持与帮助，特别是本书的主审商立群老师，对本书提出了宝贵的建议和意见，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在不妥和错误，敬请广大读者批评指正。

编　者

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目　录

前言

绪论 …… 1

第一章　同步发电机的自动并列 …… 2

第一节　概述 …… 2

第二节　准同期并列的基本原理 …… 4

第三节　频率差的测量及调整 …… 11

第四节　电压差的测量及调整 …… 16

第五节　自动准同期并列装置的合闸控制 … 19

第六节　微机型自动并列装置 …… 20

复习思考题 …… 24

第二章　电力系统电压的自动调节 …… 25

第一节　同步发电机运行电压的有关问题 … 25

第二节　同步发电机励磁系统 …… 29

第三节　励磁系统中转子磁场的建立与灭磁 …… 36

第四节　励磁调节器的基本原理及调节特性 …… 41

第五节　励磁调节器静态特性的调整 …… 44

第六节　微机型励磁调节装置 …… 47

第七节　电力系统运行电压的有关问题 …… 59

复习思考题 …… 70

第三章　电力系统频率及有功功率的自动调节 …… 71

第一节　电力系统的频率特性 …… 71

第二节　调速器的基本原理及特性 …… 80

第三节　电力系统的自动调频 …… 85

第四节　自动发电控制技术 …… 92

复习思考题 …… 95

第四章　电力系统自动化技术概论 …… 96

第一节　电力系统运行控制及其自动化概述 …… 96

第二节　配电自动化系统 …… 111

第三节　电力系统状态估计 …… 124

复习思考题 …… 136

第五章　自动重合闸 …… 137

第一节　概述 …… 137

第二节　输电线路的三相一次自动重合闸 …… 139

第三节　高压输电线路的单相自动重合闸 …… 146

第四节　高压输电线路的综合重合闸 …… 150

复习思考题 …… 151

第六章　电力系统自动低频减载装置 …… 152

第一节　概述 …… 152

第二节　自动低频减载装置的工作原理 …… 155

第三节　微机频率电压紧急控制装置 …… 159

复习思考题 …… 164

第七章　电力系统其他安全自动装置 … 165

第一节　备用电源自动投入装置 …… 165

第二节　厂用电切换 …… 170

第三节　自动解列装置 …… 172

第四节　故障录波装置 …… 174

复习思考题 …… 177

参考文献 …… 178

绪　　论

随着电力系统规模的越来越大及单机容量的不断提高，电网结构日趋复杂，电力系统的运行方式的变化越来越频繁。因此，为保证电能质量，使电力系统更加安全、可靠地运行，对电力系统自动化技术的要求越来越高，也促进了电力系统自动化技术的快速发展。

根据电力系统的组成和运行特点，电力系统的自动化技术一般包括电力系统自动监视和控制、电厂动力机械自动控制和电力系统自动装置。

电力系统自动监视和控制的主要任务是提高电力系统的安全、经济运行水平，电力系统中各发电厂、变电所把反映电力系统运行状态的实时信息，由远动终端装置送给调度控制中心的计算机系统，由计算机及时地对电力系统的运行进行分析并得出安全经济运行的决策，然后通过人机联系系统显示出来，供运行人员参考，由于经安全分析后所及时采取的预防性措施，极大地提高了电力系统运行的安全性。

电厂动力机械的控制是电厂自动控制的主要组成部分，它随电厂的类型不同而有很大差别，如火电厂中的锅炉和汽轮机的自动控制系统与水电厂中水力机械的自动控制系统分属各自专业对这一领域的研究。

电力系统自动装置，是指对发电厂、变电所电气主接线设备运行进行控制和操作的自动装置，是直接为电力系统安全、经济运行和保证电能质量服务的基础自动化设备。电压和频率是电能质量的两个主要指标，电力系统发生事故时，需要采取各种措施保证电压和频率的稳定。

在电力系统自动装置中，同步发电机的自动并列装置既可保证同步发电机并列操作的正确性和安全性，同时又加快了发电机的并列过程；同步发电机的自动励磁控制系统可保证系统电压水平、提高电力系统稳定性及加快故障切除后电压的恢复，同时可使无功功率在并联运行机组间合理分配，使系统运行更加经济；电力系统频率及有功功率的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，使电力系统频率在规定范围内变动，同时可使有功功率在并联运行机组间合理分配，提高系统运行的经济性；在电力系统自动化的进一步发展中，电网调度自动化系统可以和火电厂自动化、水电厂自动化、变电站综合自动化、配电自动化及前述各种自动化装置进行协调、融汇和整合，实现更高层次上的电力系统综合自动化，进一步保证了电能质量，提高电力系统经济运行水平；输电线路的自动重合闸装置、备用电源自动投入装置可提高系统供电的可靠性；电力系统自动低频减载装置，可防止电力系统无功不足时引起的系统频率的大幅度降低，保证系统的稳定运行。

上述这些电力系统安全自动装置及自动化技术在电力系统中应用相当普遍，为电力系统安全经济运行发挥着极其重要的作用。

第一章　同步发电机的自动并列

第一节　概　　述

一、自动并列的意义

电力系统中的负荷是随机变化的，为保证电能质量，需要经常将发电机投入和退出运行；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运行。在上述情况下，把一台空载运行的发电机经过必要的调节，在满足并列运行的条件下经断路器操作与系统并列，这种操作过程称为同步发电机的并列操作。因此，同步发电机的并列操作是发电厂中一项重要的操作。在某些情况下，需要将已经解列的电力系统的两部分重新联合运行，这种操作也属于并列操作。两电网间的并列操作与同步发电机的并列操作相比，其调节过程更为复杂，涉及的面较广，内容也较为繁琐。因此本书仅讨论同步发电机的并列操作。

在发电厂中，每一个有可能进行并列操作的断路器都称为电厂的同期点。如图 1-1 所示，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；母联断路器是同一母线上所有发电单元的后备同期点；当变压器检修完毕投入运行时，可以在变压器的低压侧进行并列操作；对于三绕组变压器，为了减少并列进行时可能出现的母线倒闸操作，保证迅速可靠地恢复供电，其高、中、低三侧都有同期点；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

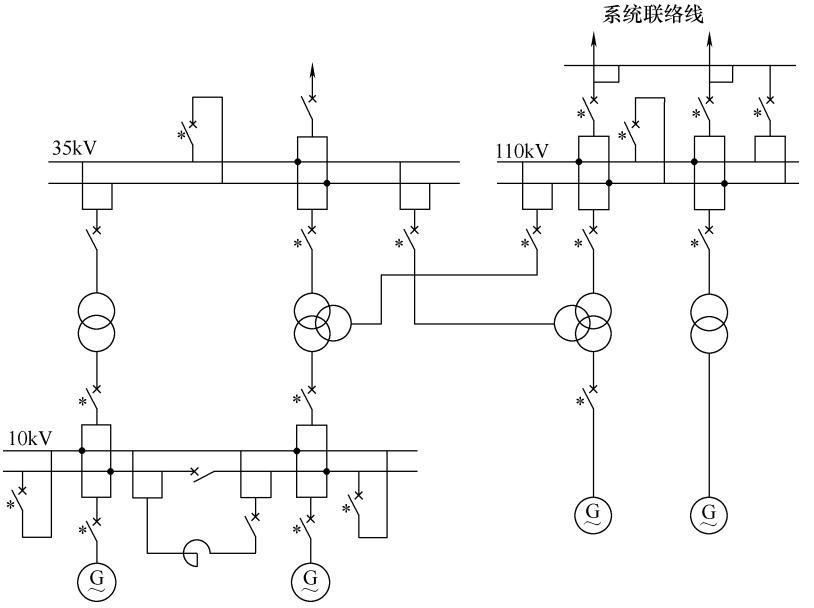


图 1-1　发电厂的同期点举例（＊表示同期点）

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，因此没有设同期点的必要。

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，如操作不当将损坏发电机并引起系统电压波动，严重时可能导致系统振荡，破坏电力系统稳定运行。因此，同步发电机组在并列时应遵循以下两个原则：

（1）并列断路器合闸时，冲击电流尽可能小，其瞬时最大值一般不超过发电机额定电流的 1 ~2 倍。

（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，以减小对电力系统的扰动。

二、同步发电机并列操作的方法

同步发电机的并列操作方法可分为准同期并列和自同期并列两种。

（一）准同期并列

准同期并列是指先给待并发电机加上励磁，使其建立起电压，调整发电机的电压和频率，在符合同步条件时，合上并列断路器，将发电机并入系统。

任一发电机电压和系统电压的瞬时值均可表示为

$$\begin{cases} u_G = U_{Gm}\sin(\omega_G t + \varphi_{0G}) \\ u_S = U_{Sm}\sin(\omega_S t + \varphi_{0S}) \end{cases} \tag{1-1}$$

式中　U_{Gm}，U_{Sm}——发电机电压和系统电压的幅值；

ω_G，ω_S——发电机电压和系统电压的角频率；

φ_{0G}，φ_{0S}——发电机电压和系统电压的初相位。

上述电压的幅值、角频率和相位是用来恒量电压的三个重要的状态量。图 1-2 为发电机与系统并列示意图，图 1-2a 中 QF 为并列断路器即同期点，QF 的一端为待并发电机 G，其电压相量为 $\dot{U}_G$；QF 的另一端为系统，其电压相量为 $\dot{U}_S$。由于 QF 两侧电压的状态量不相等，QF 触头两端存在电压差 $\dot{U}_d$，如图 1-2b 所示。

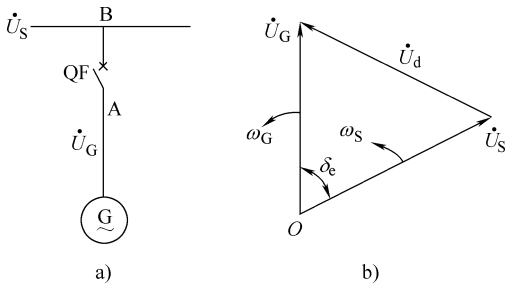


图 1-2　发电机与系统并列示意图

a）一次系统图　b）相量图

当电网参数一定时，$\dot{U}_d$ 值越大，则合闸瞬间产生的冲击电流就越大。若要合闸瞬间冲击电流等于零且对电网不产生任何扰动，则应使 $\dot{U}_d$ 值为零。因此，发电机并入系统的理想条件是断路器两侧电压的三个状态量完全相等，即

$$\left.\begin{aligned} &\omega_G = \omega_S \text{ 或 } f_G = f_S \\ &U_G = U_S \\ &\delta_e = 0 \end{aligned}\right\} \tag{1-2}$$

式中　δ_e——发电机电压 $\dot{U}_G$ 和系统电压 $\dot{U}_S$ 之间的相位差。

当满足上述条件时，则图 1-2b 中 $\dot{U}_G$ 和 $\dot{U}_S$ 两个相量完全重合并保持同步旋转，并列合闸瞬间的冲击电流等于零，且并列后发电机与电网立即进入同步运行状态，没有任何扰动现象。

（二）自同期并列

自同期并列是将一台未加励磁电流的发电机升速到接近额定转速，转差角频率 ω_d（$\omega_d = \omega_G - \omega_S$）不超过允许值，且在机组的加速度小于一定值的前提下，首先合上并列断路器 QF，接着立即合上励磁开关 SE，给发电机加上励磁电流，在发电机电动势逐渐增加的过程中，由系统将并列的发电机拉入同步运行。其并列示意图如图 1-3 所示。

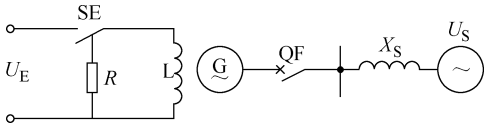


图 1-3　自同期并列示意图

在发电机以自同期方式并入电网的瞬间，未经励磁的发电机接入电网，相当于电网经发电机次暂态电抗 X_d''短路，由此产生的冲击电流周期分量 I_m''为

$$I_m'' = \frac{U_S}{X_d'' + X_S} \tag{1-3}$$

式中　U_S——归算到发电机端的系统电压；

　　X_S——归算后的系统等值电抗。

式(1-3）表明，当发电机参数一定时，自同期并列的冲击电流主要取决于系统的情况，即决定于 U_S 和 X_S 的大小。

自同期并列方式的优点是操作简单、速度快，在系统发生故障、频率波动较大时，发电机组能迅速投入运行，可避免故障扩大，有利于处理系统事故。但因合闸瞬间发电机定子吸收大量无功功率，导致合闸瞬间系统电压下降较多，将对其他用电设备的正常工作产生一定的影响，因此，自同期并列方式在使用时有其局限性。GB 14285—2006《继电保护和安全自动装置技术规程》规定：“在正常运行情况下，同步发电机的并列应采用准同期并列方式；在故障情况下，水轮发电机可以采用自同期并列方式”。

由于准同期并列时冲击电流比较小，不会使系统电压下降，并列后容易拉入同步，因而在系统中应用较为普遍。本章主要讨论同步发电机的准同期并列装置。

第二节　准同期并列的基本原理

一、准同期并列条件分析

当发电机采用准同期并列时，最理想的并列情况是在断路器触头合闸的瞬间，发电机电压和系统电压的三个状态量完全相等，即如式(1-2)，这样并列过程中产生的冲击电流为零，对系统不会造成任何扰动。但是，在实际运行中，同时满足式(1-2）中的三个条件几乎是不可能的，事实上也没有必要。只要并列时产生的冲击电流小于规定的允许值，不会危及设备安全，并列过程中对发电机和系统影响较小，不致引起不良后果，可以允许三个状态量有一定的偏差。但是，偏差值要控制在一定的允许范围内。下面分别分析式(1-2）中的任一条件不满足时所产生的冲击电流。

（一）电压幅值不相等

设发电机并列时断路器两侧电压相量如图 1-4a 所示，即断路器两侧电压的频率相等，合闸时相位差等于零，但两电压幅值不相等。

由于电压幅值不等所产生的冲击电流的有效值为

$$I''_{m}=\frac{U_G-U_S}{X''_d+X_S} \tag{1-4}$$

式中　U_G，U_S——发电机电压、电网电压有效值；

X''_d——发电机直轴次暂态电抗；

X_S——系统等值电抗。

由图 1-4a 可见，冲击电流主要为无功电流分量，其瞬时最大值为

$$i''_{m}=1.8\sqrt{2}I''_{m} \tag{1-5}$$

这时冲击电流所产生的电动力会对发电机绕组产生危害，当电动力较大时，有可能引起发电机绕组的端部变形。

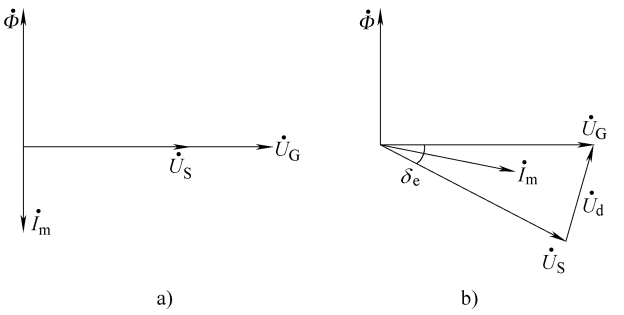


图 1-4　准同期并列条件分析

a）电压幅值不相等　b）相位差不为零

（二）相位不相同

设并列合闸时断路器两侧电压相量如图 1-4b 所示，即断路器两侧电压幅值相等、频率相等，但在合闸瞬间存在相位差。

由于合闸瞬间存在相位差所产生的冲击电流有效值为

$$I''_{m}=\frac{2U_G}{X''_q+X_S}\sin\frac{\delta_e}{2}\approx\frac{U_G}{X''_q+X_S}\sin\delta_e \tag{1-6}$$

式中　X''_q——发电机交轴次暂态电抗。

当 δ 很小时，有 $2\sin\frac{\delta_e}{2}\approx\sin\delta_e$。参照式(1-5)，可求出其冲击电流最大瞬时值。这时冲击电流既有有功分量，也有无功分量，当相位差较小时主要为有功电流分量，说明合闸后发电机与电网间立刻交换有功功率，使机组的联轴受到突然冲击。合闸相位差的存在，意味着在并列瞬间，发电机定子所产生的电磁转矩在极短的时间内要强迫转子纵向磁轴与其取向一致，不难想象一个数百吨重的转子在很短时段内立即旋转一个相当于相位差的电角度会产生巨大的机械转矩冲击，这会导致发电机转子绕组及轴系的机械损伤。因此，为了保证机组的安全运行，应将此冲击电流限制在较小数值内，也就是要将并列时的相位差 δ_e 控制在一定范围内，而且当发电机容量越大时，对 δ_e 值的限制越严。

（三）频率不相等

设待并发电机与系统的电压相量如图 1-5a 所示，即断路器两侧电压幅值相等、但两电压频率不同。

由于频率不相等，在断路器两侧产生的电压差为脉振变化，如图 1-5b 所示，脉振电压 u_d 为

$$u_d=U_{Gm}\sin(\omega_G t+\varphi_{0G})-U_{Sm}\sin(\omega_S t+\varphi_{0S}) \tag{1-7}$$

设 $\varphi_{0G}=\varphi_{0S}=0$，$U_{Gm}=U_{Sm}$，则

$$u_d=2U_{Gm}\sin\left(\frac{\omega_G-\omega_S}{2}t\right)\cos\left(\frac{\omega_G+\omega_S}{2}t\right) \tag{1-8}$$

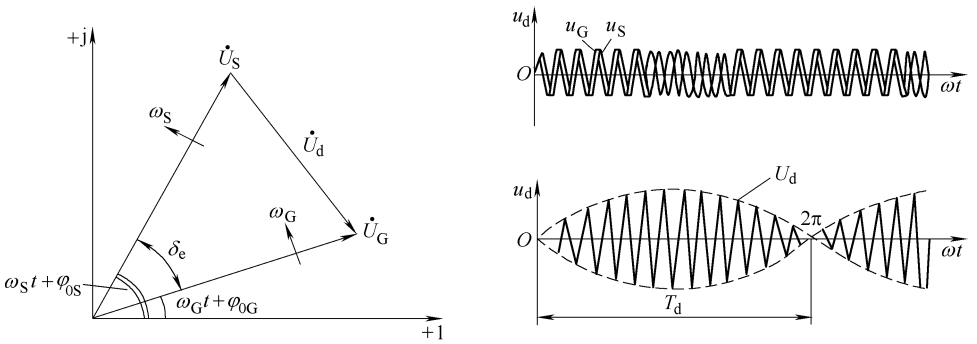


图 1-5　脉振电压

a）相量图　b）波形图

定义 $U_d=2U_{Gm}\sin\left(\dfrac{\omega_G-\omega_S}{2}t\right)$ 为脉振电压的幅值，则式(1-8）可表示为

$$u_d=U_d\cos\left(\frac{\omega_G+\omega_S}{2}t\right) \tag{1-9}$$

由式(1-9）可见，脉振电压 u_d 的波形可看成是幅值为 U_d、频率接近于工频的交流电压。

发电机电压与系统电压的频率差称为转差，用 f_d 表示；其角频率差相应称为转差角频率，用 ω_d 表示。即

$$\left.\begin{aligned}f_d&=f_G-f_S\\ \omega_d&=\omega_G-\omega_S\end{aligned}\right\} \tag{1-10}$$

图 1-5a 所示两电压相量的相位差 δ_e 为

$$\delta_e=\omega_d t \tag{1-11}$$

因此，脉振电压的幅值 U_d 又可表示为

$$U_d=2U_{Gm}\sin\frac{\omega_d t}{2}=2U_{Gm}\sin\frac{\delta_e}{2}=2U_{Sm}\sin\frac{\delta_e}{2} \tag{1-12}$$

由图 1-5b 可见，若将系统电压 $\dot{U}_S$ 作为参考相量，则待并发电机电压 $\dot{U}_G$ 将以转差角频率 ω_d 的速度围绕 $\dot{U}_S$ 旋转，当相位 δ_e 由 0 到 π 时，$\dot{U}_d$ 相应从零变到最大值；当 δ_e 从 π 变到 2π 时，$\dot{U}_d$ 又从最大值回到零。$\dot{U}_G$ 旋转一周的时间称为一个脉振周期，用 T_d 表示。则 T_d 与转差频率 f_d 及转差角频率 ω_d 的关系为

$$T_d=\frac{1}{f_d}=\frac{2\pi}{\omega_d} \tag{1-13}$$

脉振周期 T_d、转差频率 f_d 及转差角频率 ω_d 均可用来表示待并发电机频率与电网频率之间的差值。转差频率大，则脉振周期短；转差频率小，则脉振周期长。例如，某发电机并列时，规定允许的转差角频率为 $\omega_d\leqslant 0.2\%\omega_N$，$f_N=50\text{Hz}$，即

$$\omega_d\leqslant 0.2\times\frac{2\pi f_N}{100}=0.2\pi\ \text{rad/s}$$

对应的脉动电压周期 T_d 为

$$T_d \geqslant \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{2\pi}{0.2\pi} = 10\text{s}$$

也就是说，当脉振周期 $T_d > 10\text{s}$ 时，转差角频率 $\omega_d < 0.2\%\omega_N$，满足发电机并列的要求。

由式(1-11) 可知，当转差角频率 ω_d 一定时，相位差 δ_e 是时间 t 的函数，所以并列时合闸相位差与发出合闸信号的时间有关，如果刚好在 $\delta_e = 0$ 时合上并列断路器触头，则合闸瞬间的冲击电流等于零；如果在 $\delta_e = \pi$ 时并列断路器触头合闸，则产生最大冲击电流，给系统和发电机带来较大危害。因此，选择发出合闸信号的时刻非常关键，这一问题将在后面的内容中着重讨论。另外还需指出，如果并列时发电机与系统频率差较大，即使合闸时相位差 δ_e 很小，但合闸后发电机需要经历一个很长的暂态过程才能进入同步运行状态，严重时可能失步，因此从并列后应迅速进入同步运行的角度出发，应控制并列时的频率差。

式(1-12) 所示的脉振电压 U_d 与相位差 δ_e 间的函数关系可用波形图表示，如图 1-6 所示。由图 1-6 可见：

当 $\delta_e = 0$ 时，$U_d = 0$；

当 $\delta_e = \pi$ 时，$U_d = 2U_{Gm} = 2U_{Sm}$。

因此，通过测量脉振电压的数值即可判断 δ_e 的大小。

另外，在图 1-6 中，脉振电压两最小值之间的时间差，刚好是一个脉振周期 T_d，所以通过测量该时间的长短便可知转差频率 f_d 和转差角频率 ω_d 的大小。

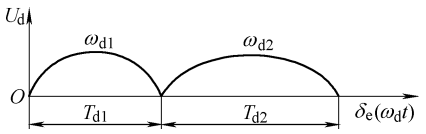


图 1-6　$U_G = U_S$ 时脉振电压 U_d 的波形

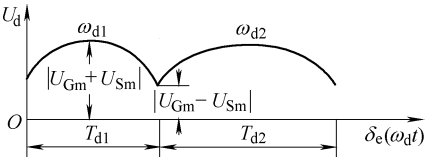


图 1-7　U_G 与 U_S 不相等时脉振电压 U_d 的波形

图 1-7 所示为发电机电压与系统电压不相等时脉振电压的波形图。由图 1-5a 的相量图可知，当断路器两侧电压幅值不相等时，脉振电压 U_d 可由三角公式求得：

$$U_d = \sqrt{U_{Gm}^2 + U_{Sm}^2 - 2U_{Gm}U_{Sm}\cos\delta_e} \tag{1-14}$$

当 $\delta_e = 0$ 时，$U_d = U_{Gm} - U_{Sm}$，此时脉振电压最小，为两电压幅值差。

当 $\delta_e = \pi$ 时，$U_d = U_{Gm} + U_{Sm}$，此时脉振电压最大，为两电压幅值和。

在图 1-7 中，脉振电压的最小值即反应了断路器两侧电压差的大小；两最小值之间的时间代表了脉振周期的长短；电压最小值出现在相位差最小时。

上述分析表明，在脉振电压 $\dot{U}_d$ 的波形中含有准同期并列需检测的三个条件，即电压幅值差、频率差以及相位差随时间变化的规律。因此可见，脉振电压是一个非常重要的量，通过其波形中所包含的这些信息，即可判断准同期并列的条件是否满足要求。因此在早期的准同期并列装置中，多利用脉振电压进行并列条件的检测。但随着电子元器件的更新和自动控制技术的发展，其检测方法也有所不同，在后续的内容中将详细讲述。

需要指出的是，并列过程中转差角频率 ω_d 不仅在不同的脉振周期具有不同值，即使在同一个脉振周期内，ω_d 也是变化的。但为了简化分析，在图 1-6 和图 1-7 中，假设一个脉振周期内 ω_d 不变。

由以上对三个准同期并列条件的分析可知，在准同期并列时，电压差、相位差和频率差都会对发电机的运行、寿命及系统稳定产生直接的影响，但电压差和频率差产生的影响要轻于相位差的危害。在两电源间存在电压差和频率差时并列，会造成无功功率和有功功率的冲击，即在断路器合闸的瞬间，电压高的一侧会向电压低的一侧输送无功功率，频率高的一侧会向频率低的一侧输送有功功率，但在发电机空载的情况下，即使存在较大的电压差和频率差，其所产生的功率交换也是有限的，不会对发电机造成伤害。因为发电机在正常运行时具有承受一定负荷波动的能力。但是，如果在具有较大相位差的情况下并列，如前所述，会对发电机转子轴系产生较大损害，例如绕组线棒变形松脱、出现转子一点或多点接地、联轴器螺栓扭曲、主轴出现裂纹等。

二、准同期并列装置的构成

准同期并列装置主要由频率差控制单元、电压差控制单元和合闸信号控制单元组成，如图1-8所示。

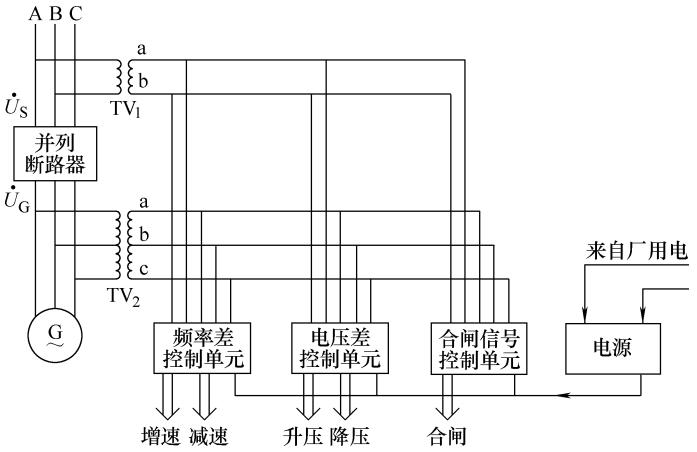


图1-8　准同期并列装置主要组成部件

（1）频率差控制单元：其作用是检测发电机电压 $\dot{U}_G$ 与系统电压 $\dot{U}_S$ 间的转差角频率 ω_d，调节发电机的转速，使待并发电机的频率接近于系统频率。

（2）电压差控制单元：其功能主要是检测发电机与系统间的电压差 U_d、调节发电机电压，使之与系统电压间的差值小于规定允许值，以促使并列条件的形成。

（3）合闸信号控制单元：其功能是检查并列条件，当待并发电机的频率与电压都满足并列要求时，选择适当的时间发出合闸信号，使并列断路器主触头接通时，相位差 δ_e 接近于零或控制在允许的范围内。

三、准同期并列装置的分类

发电机的准同期并列装置，按其自动化程度的不同可以分为以下几种。

（一）手动准同期并列装置

手动准同期并列装置是将供同期操作用的表计和操作开关装在同步小屏或中央信号屏上，运行操作人员通过监视电压表、频率表和同步表，判断待并发电机与系统间的电

压差 U_d、频率差 ω_d 的大小并进行调整，当并列条件满足时，选择合适的时间操作断路器合闸。

在手动准同期并列中，待并发电机电压和频率完全由操作人员手动调节，使其逐渐接近系统电压和频率，当电压差和频率差小于规定允许值时，捕捉最佳合闸时机，在相位差 δ_e 符合要求时将断路器合上。在此过程中，由于操作人员技术不娴熟及紧张犹豫等原因，可能会延误并网时机，拖长并网时间；也可能在存在相位差的情况下并网，给发电机带来一定的冲击。另外，当几台机组共用一套并列装置时，各机组间的控制电缆较多，接线复杂，同步屏与并列断路器的控制地点距离较远，由于视觉误差可能引起同步操作错误。

（二）半自动准同期并列装置

半自动准同期并列装置是指在并列过程中，待并发电机的电压 U_G 和频率 f_G 由运行操作人员监视和调整，当频率和电压都满足并列条件时，并列装置自动选择合适的时间发出合闸信号。它与手动准同期并列的区别是合闸信号由装置经判断后自动发出，而不是由运行人员手动合闸。

（三）自动准同期并列装置

自动准同期并列装置是在并列过程中，由装置自动监视发电机与系统间的电压差和频率差，当电压差和频率差不合格时，由自动调节单元发出调节脉冲，直到 U_d 和 ω_d 符合要求后，自动选择理想的时机发出合闸信号。

由于发电机一般都配有自动电压调节装置，因此在有人值班的发电厂中，发电机的电压往往由运行人员直接操作控制，这样在图 1-8 中不必配置电压差控制单元，从而简化了并列装置的结构；在无人值班的发电厂中，自动准同期并列装置需设置具有电压自动调节功能的电压差调整单元，当发电机并列时，其电压和频率都由并列装置自动调节，整个并列过程无需运行人员参与。

在准同期并列装置中，合闸信号的控制是整个装置的核心，其控制原则是在电压差和频率差都满足并列条件的情况下，适时发出合闸信号，使断路器触头在 $\delta_e=0$ 时闭合。由于并列装置合闸出口继电器具有一定的动作时间 t_C 以及断路器存在固有的合闸时间 t_{QF}，因此，若要在 $\delta_e=0$ 的瞬间断路器触头刚好闭合，就必须在此之前发出合闸信号。根据合闸信号所取提前量的不同，准同期并列装置又可分为恒定越前相位和恒定越前时间两种不同类型。

1. 恒定越前相位准同期并列

恒定越前相位准同期并列是指合闸信号的提前量为一恒定的相位 δ_{YJ}，即在发电机电压相量 $\dot{U}_G$ 与系统电压相量 $\dot{U}_S$ 重合（$\delta_e=0$）之前 $\delta_e=\delta_{YJ}$ 时，发出合闸信号。

由于在并列断路器合闸前发电机频率是变化的，即在不同脉动周期其转差角频率 ω_d 具有不同的值，即使在同一个脉振周期内 ω_d 也可能是不固定的。因此，每个脉振周期与恒定越前相位 δ_{YJ} 对应的越前时间 t_{YJ} 也是不同的，它与 δ_{YJ} 的关系为

$$t_{YJ}=\frac{\delta_{YJ}}{\omega_d} \tag{1-15}$$

设在某一脉振周期 $\omega_d=\omega_{d1}$，在 $\delta_e=\delta_{YJ}$ 时发出合闸信号，则与此对应的越前时间 $t_{YJ}=\delta_{YJ}/\omega_{d1}$，如果此时间刚好等于并列装置出口继电器的动作时间 t_C 和断路器的合闸时间 t_{QF} 之和，则意味着在断路器触头闭合时刚好 $\delta_e=0$，此过程可用相量图 1-9 表示。

在图 1-9 中，仍将系统电压 $\dot{U}_S$ 作为参考相量，待并发电机电压 $\dot{U}_G$ 将以转差角频率 ω_d

的速度围绕 $\dot{U}_S$ 逆时针方向旋转（假设 $\omega_G > \omega_S$）。图 1-9a 所示为 $\omega_d = \omega_{d1}$，合闸时发电机电压相量 $\dot{U}_G$ 与系统电压 $\dot{U}_S$ 重合。

（1）当 $\omega_d = \omega_{d2} > \omega_{d1}$ 时，则越前时间 $t_{YJ} < t_C + t_{QF}$，即在断路器合闸时，发电机电压相量 $\dot{U}_G$ 已经超前于系统电压 $\dot{U}_S$，如图 1-9b 所示。

（2）当 $\omega_d = \omega_{d3} < \omega_{d1}$ 时，则越前时间 $t_{YJ} > t_C + t_{QF}$，即在断路器合闸时，发电机电压相量 $\dot{U}_G$ 滞后于系统电压 $\dot{U}_S$，如图 1-9c 所示。

由此可见，当提前量为恒定相位时，很难保证从发出合闸信号到断路器合上时，$\dot{U}_G$ 与 $\dot{U}_S$ 刚好重合。这样便可能造成合闸时存在相位差，由此相位差产生一定的冲击电流。

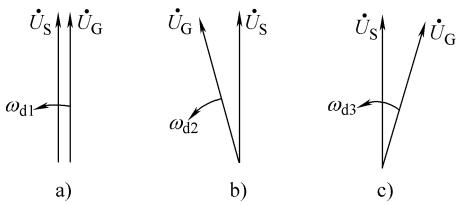


图 1-9　恒定越前相位原理分析

a）$\omega_d = \omega_{d1}$　b）$\omega_{d2} > \omega_{d1}$　c）$\omega_{d3} < \omega_{d1}$

2. 恒定越前时间准同期并列

恒定越前时间准同期并列是指合闸信号的提前量为一恒定的时间 t_{YJ}，即在发电机电压相量 $\dot{U}_G$ 与系统电压相量 $\dot{U}_S$ 重合（$\delta_e = 0$）之前 t_{YJ} 时发出合闸信号。因为越前时间是固定的，因此，在不同的脉振周期与越前时间对应的越前相位 δ_{YJ} 是变化的，δ_{YJ} 与 ω_d 成正比。如果整定 $t_{YJ} = t_C + t_{QF}$，则从理论上讲，在不同的脉振周期，无论 ω_d 等于多少，都可以保证断路器合闸时相位差 $\delta_e = 0$。但实际上由于装置的越前信号时间、出口继电器的动作时间及断路器的合闸时间存在分散性，因而合闸时仍难免具有合闸相位误差。当 ω_d 越大时，合闸误差角就越大，由此产生的冲击电流也就越大，因此合闸时转差角频率必须限制在一定范围之内。

由于恒定越前时间准同期并列的优点，在准同期并列装置中，大多采用恒定越前时间原理实现合闸信号的控制。

四、恒定越前时间准同期并列装置的整定计算

（一）越前时间 t_{YJ}

根据前面分析，恒定越前时间应等于并列装置出口继电器的动作时间 t_C 与断路器合闸时间 t_{QF} 之和，即

$$t_{YJ} = t_C + t_{QF} \tag{1-16}$$

当并列断路器的类型不同时，其合闸时间也有所区别，并列装置中的越前时间 t_{YJ} 应能随之相应调整。

（二）允许电压差

并列时断路器两侧的电压差会导致冲击电流，其大小与电压差值成正比。因此，为了限制并网合闸时的冲击电流，一般规定待并发电机电压 U_G 与系统电压 U_S 间的差值 U_d 不应超过额定电压 U_N 的 10% ~15%，即

$$U_d \leqslant (0.1 \sim 0.15) U_N \tag{1-17}$$

（三）允许转差角频率

由于并列装置出口继电器和断路器的合闸时间都存在误差，因此造成断路器合闸时有一定的相位误差，由于合闸相位差产生的冲击电流有效值可根据式(1-6）求出。假设发电机