

高等工科院校系列教材

电力系统自动装置

许克明 田怀智 编



重庆大学出版社

电力系统自动装置

ND39/28
许克明 田怀智 编



399084

重庆大学出版社

内 容 提 要

本书以电力系统最基本、常用的、重要的自动操作装置、自动调节装置作为基本内容,并根据系统的发展,介绍了当前最新的、处于发展中的自动化系统。全书共五章,分别论述了同步发电机的自动并列、同步发电机自动励磁调节系统、电力系统频率及有功功率的自动调节、按频率自动减负荷及其它安全自动控制装置、电力系统调度自动化的监控技术及配电网负荷控制技术。

电力系统自动装置

许克明 田怀智 编

责任编辑 韩 洁

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆建筑大学印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:10.5 字数:257千

1996年5月第1版 1996年5月第1次印刷

印数:1—8000

ISBN 7-5624-1110-7/TM·46 定价:8.50元

(川)新登字 020 号

序

近年来我国高等专科教育发展很快,各校招收专科生的人数呈逐年上升趋势,但是专科教材颇为匮乏,专科教材建设工作进展迟缓,在一定程度上制约了专科教育的发展。在重庆大学出版社的倡议下,中国西部地区14所院校(云南工学院、贵州工学院、宁夏工学院、新疆工学院、陕西工学院、广西大学、广西工学院、兰州工业高等专科学校、昆明工学院、攀枝花大学、四川工业学院、四川轻化工学院、渝州大学、重庆大学)联合起来,编写、出版机类和电类专科教材,开创了一条出版系列教材的新路。这是一项有远见的战略决策,得到国家教委的肯定与支持。

质量是这套教材的生命。围绕提高系列教材质量,采取了一系列重要举措:

第一,组织数十名教学专家反复研究机类、电类三年制专科的培养目标和教学计划,根据高等工程专科教育的培养目标——培养技术应用型人才,确定了专科学生应该具备的知识和能力结构,据此制订了教学计划,提出了50门课程的编写书目。

第二,通过主编会议审定了50门课程的编写大纲,不过分强调每门课程自身的系统性和完整性,从系列教材的整体优化原则出发,理顺了各门课程之间的关系,既保证了各门课程的基本内容,又避免了重复和交叉。

第三,规定了编写系列专科教材应该遵循的原则:

1. 教材应与专科学生的知识、能力结构相适应,不要不切实际地拔高;
2. 基础理论课的教学应以“必须、够用”为度,所谓“必须”是指专科人才培养规格之所需,所谓“够用”是指满足后续课程之需要。
3. 根据专科的人才培养规格和人才的主要去向,确定专业课教材的内容,加强针对性和实用性;
4. 减少不必要的数理论证和数学推导;
5. 注意培养学生解决实际问题的能力,强化学生的工程意识;
6. 教材中应配备习题、复习思考题、实验指示书等,以方便组织教学;
7. 教材应做到概念准确,数据正确,文字叙述简明扼要,文、图配合适当。

第四,由出版社聘请学术水平高、教学经验丰富、责任心强的专家担任主审,严格把住每门教材的学术质量关。

出版系列专科教材堪称一项“浩大的工程”。经过一年多的艰苦努力,系列专科教材陆续面市了。它汇集了中国西部地区14所院校专科教育的办学经验,是西

部地区广大教师长期教学经验的结晶。

纵观这套教材,具有如下的特色:它符合我国国情,符合专科教育的教学基本要求和教学规律;正确处理了与本科教材、中专教材的分工,具有很强的实用性;与出版单科教材不同,有计划地成套推出,实现了整体优化。

这套教材立足于我国西部地区,面向全国市场,它的出版必将对繁荣我国的专科教育发挥积极的作用。这套教材可以作为大学专科及成人高校的教材,也可作为大学本科非机类或非电类专业的教材,亦可供有关工程技术人员参考。因此我不揣冒昧向广大读者推荐这套系列教材,并希望通过教学实践后逐版修订,使之日臻完善。

吴云鹏

1993年
仲夏

前 言

本教材是根据国家教委颁布的《电力系统自动装置》(专科)教学大纲编写的。它适合作“电力系统及其自动化”专业及相近专业专科的专业教材,并可作为该专业本科的教学参考书。

本书还可供有关工程技术人员参考。

全书共分五章,其中第一章、第二章的第九、十节及第四章第一、二节由新疆工学院田怀智编写,其余部分由贵州工学院许克明编写。

本书由上海交通大学杨冠城教授主审。他对本书内容提了极为宝贵的意见,为此表示衷心感谢。

限于编者水平,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

1995.5

目 录

绪论	1
第一章 同步发电机的自动并列	4
§ 1-1 概述	4
§ 1-2 准同期并列原理	6
§ 1-3 恒定越前时间型自动准同期装置	13
附录 MZ-10 型组合式同步表简介	34
复习思考题	35
第二章 同步发电机自动励磁调节系统	37
§ 2-1 概述	37
§ 2-2 励磁系统的换流电路	47
§ 2-3 自动励磁调节装置原理概述	52
§ 2-4 半导体自动励磁调节装置工作原理	55
§ 2-5 励磁调节器静特性调整	66
§ 2-6 并联运行机组间无功功率的分配	69
§ 2-7 励磁调节系统动态特性概述	72
§ 2-8 自动励磁调节系统对电力系统稳定的影响	77
§ 2-9 继电强行励磁装置与继电强行减磁装置	82
§ 2-10 相位复式励磁原理与 KFD-3 型相复励自动励磁调节装置	86
§ 2-11 同步发电机的灭磁	102
复习思考题	104
第三章 电力系统频率及有功功率的自动调节	106
§ 3-1 概述	106
§ 3-2 调速系统的工作原理及特性	107
§ 3-3 电力系统的频率特性	110
§ 3-4 电力系统调频方法	116
§ 3-5 电力系统的经济调度及自动调频简介	123
复习思考题	126
第四章 按频率自动减负荷及其它安全自动控制装置	127
§ 4-1 概述	127
§ 4-2 按频率自动减负荷	127
§ 4-3 自动解列装置	135

§ 4-4 水轮机组低频自启动装置	137
复习思考题	139
第五章 电力系统调度自动化的监控技术及配电网负荷控制技术简介.....	140
§ 5-1 概述	140
§ 5-2 电力系统 SCADA 系统的基本构成原理	141
§ 5-3 负荷控制技术	146
复习思考题	157
参考文献.....	158

绪 论

一、电力系统与自动化的关系

由于电力系统的固有特点,即发电、输电及用电的同时性,而又相互影响;且地域广阔,只有借助自动化手段才能保证电力系统安全运行和使电能质量符合指标,进而提高电力系统经济运行水平。

随着当代电力系统的发展,电网的电压更高,距离更远、容量更大,运行方式更趋复杂,对电力系统自动化的要求越来越严、越来越高。因此,促进了电力系统自动化技术的进一步发展。

利用计算机与自动化技术实现的安全稳定控制系统、调度自动化系统,已成为现代电网必须具备的、赖以存在的支柱。而若干基本自动装置则是维持电力系统正常运行的基础。

二、电力系统自动化的范畴与分类

对电力系统的管理,即监测与控制,均能应用自动化技术及其实现的装置来完成。这样的工作,比人工更及时、更快、更精确,更能全面响应,因而更符合电力系统需要。也正因为如此,自动化范围涉及面很广。

在电力系统中使用的自动装置可分成以下几种类型。

1. 自动操作型装置

这是保证电厂与电网安全运行的自动装置。包括正常操作与反事故操作型两大类,后者又称为安全自动控制装置。这类自动装置的工作模式均可用图 0-1 表示。图中的控制信号作用于受控设备。

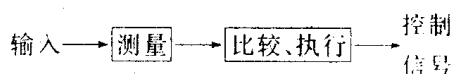


图 0-1 自动操作型装置工作模式

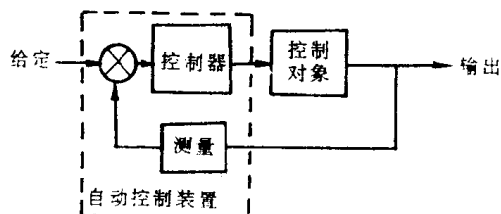


图 0-2 自动调节系统工作过程框图

这一类装置包括各种动力机械的自动控制装置、自动并列、强行励磁、自动按频率减负荷、自动解列、自动切机、电力负荷控制等等装置。广义地看,继电保护及自动重合闸等也应属于安全自动控制装置,只因其工作的特殊性、多样性及系统性,继电保护已成为一门独立发展的学科。

2. 自动调节(控制)系统(装置)

这是保证电力系统正常稳定运行,保证电网电能质量符合指标,进而实现电网经济运行的重要自动化技术。其工作方式如图 0-2 所

示,装置按闭环控制系统方式进行工作。其中包括极其重要的励磁控制系统、自动调频系统。它们起到保持频率为额定、电压在容许范围的功能;并使有功功率、无功功率分配合理,进而实现电网经济运行。

3. 电力系统监控系统

这是为电力系统调度服务的调度自动化系统。其主要任务是提高电力系统的安全、经济运行水平,迅速处理系统事故,使造成的影响最小。

整个系统借助于计算机数据采集和监控系统(SCADA 系统)技术与数字通信技术来实现,是现代电力系统必备的调度设施。

三、本课程的内容

1. 教材特点

本教材以电力系统最基本、最常用的自动操作装置、自动调节装置作为基本内容,根据系统的发展,也介绍了当前处于发展中的自动化系统。

电力系统自动化是服务于电力系统的,因此,本课程根据《电力系统》课程的内容,按自动装置所提出的要求来阐述涉及到的电力系统运行知识及基本规律。

电力系统自动化技术总是随着自动控制理论、电子技术及计算机技术的发展而不断更新。作为专业课,在论述到相关知识时,均认为有关课程,即《自动控制理论》、《电子技术基础》、《计算机原理及应用》课程已讲授,故不重复。只当认为相关基础未提及或必须着重说明时,才补充或简要重复,目的只在讲清装置的原理及工作。

由于自动化技术发展特别快,每一种功能的自动装置均可能有若干型式。在讨论某一种自动装置时,只选择具有代表性,并在技术上有一定先进性的装置作为分析对象,而不可能对每一种型式均给予介绍。

2. 教材内容

根据教学大纲基本要求,本书分五章讲授。

第一章为同步发电机的自动并列。这是电力系统运行中一项重要的操作,自动并列装置则是既重要、又常用的自动操作装置。通过对各种并列理论的介绍,可以加深对电力系统并联运行行为的理解。因此,对并列装置工作原理作了较为详细的叙述。考虑到专科教学特点,还对中小厂站常用的组合式同步表作了简介。

第二章为同步发电机自动调节励磁系统。这是电力系统自动调节的一项重要内容,是保持电力系统的电压与无功合理分配的手段。本章对调节系统的静、动态特性,以及对电力系统稳定的影响均作了分析,并介绍了典型调节装置的工作原理。由于至今在许多电厂中仍运行着电磁型励磁调节器,本章对此也作了介绍。

第三章是电力系统频率及有功功率的自动调节。这也是一项典型的电力系统自动调节过程,因为电力系统对频率要求的特殊性,以及有功功率分配的合理性与经济运行相关,因此本章主要讨论频率的静态特性及频率调节的几种基本方法。

第四章是按频率自动减负荷及其它安全自动控制装置。重点讨论了事故情况下频率的动态特性及防止事故扩大的几种自动装置。

第五章为电力系统调度自动化及电力负荷控制技术简介。由于调度自动化涉及范围很广,

本章只指明其包含的主要内容,并简要介绍实现调度自动化的主要技术手段——SCADA 系统的基本工作原理。本章还对配电网中的电力负荷控制技术作了扼要介绍。

本教材中文字符号较多。文字符号主要按国标规定;国标未具体规定处,采用工程中仍使用的拼音文字符号。符号下标基本采用英语编写;当被下标说明的符号为拼音字符时,下标按被说明文字型式标注。

第一章 同步发电机的自动并列

§ 1-1 概 述

一、并列的定义及并列操作的重要性

为了提高供电的可靠性和电能质量,电力系统中的发电机通常都采用并联运行。根据系统运行情况的需要,有时会将一台或多台同步发电机退出或投入运行,在某些情况下,甚至需要将已被解列为两部分的电力系统重新恢复并列运行。同步发电机投入电力系统并列运行的操作,或者,电力系统解列的两部分进行并列运行的操作称为并列或同期操作。

实践证明,在发电机并列瞬间,往往伴随有冲击电流和冲击功率。这些冲击,将引起系统电压瞬间下降。如果并列操作不当,冲击电流过大,还可能引起机组大轴发生机械损伤,或者引起机组绕组电气损伤。发电机并列是一项经常性操作,在系统发生事故出现功率缺额时,也往往要求将备用发电机组迅速投入电网。因此,并列操作在电力系统中是频繁而必要的。为了避免并列操作不当而影响电力系统的安全运行,发电机的同期并列,应满足下列两个基本要求:

- (1)发电机投入瞬间冲击电流应尽可能小,其最大值不应超过允许值;
- (2)发电机组并入系统后,应尽可能快的进入同步运行状态。

二、并列的方式

并列的方式可分为两种,它们是准同期并列和自同期并列(特殊条件下,还有非同期并列方式)。

1. 准同期并列

准同期是待并机组并列前,转子先加励磁电流,并调整到使发电机电压与系统电压相等;同时调整发电机转速使发电机频率与系统频率相等。当上述两个条件满足时,在相位重合前一定时刻发出合闸脉冲,合上发电机与系统之间的并列断路器,这种并列称为准同期并列。

采用准同期并列的优点是:在正常情况下,并列时产生的冲击电流比较小,对系统和待并发电机均不会产生什么危害,因而在电力系统中得到广泛采用。

准同期并列的缺点是:因同期时需调整待并发电机的电压和频率,使之与系统电压、频率接近。这就要花费一定时间,使并列时间加长,不利于系统发生事故出现功率缺额时及时投入备用容量。

2. 自同期并列

自同期是待并发电机并列时,转子先不加励磁,调整待并发电机的转速,当转速接近同步转速时(正常情况下频差允许为(2~3)%,事故情况下可达10%),首先合上机端断路器,接着立刻合上励磁开关,给转子加励磁电流,在发电机电势逐渐增长的过程中由系统将发电机拉入同步运行。

自同期最大的优点是投入迅速,操作简单。当系统发生事故要求备用机组迅速投入时,采用这种并列方式比较有效。它的缺点是:并列过程出现较大的冲击电流,对发电机不利。此外,自同期初期,待并发电机不加励磁,它将从系统吸收无功功率,从而导致系统电压突然降低,影响供电质量。因此,对自同期的应用规定了较严格的限制条件。

应用自同期并列方式将发电机投入系统时,因为发电机不加励磁,这相当于系统经过很小的发电机纵轴次暂态电抗 X''_d 而短路,所以合闸时的冲击电流较大,这会引起系统电压的短时下降。自同期合闸时最大冲击电流的周期分量 $I_{i, cy}$ 可由下式求得:

$$I_{i, cy} = \frac{U}{(X''_d + X)} \quad (1-1)$$

式中 X''_d ——发电机纵轴次暂态电抗;

X ——系统电抗;

U ——系统电压。

发电机母线电压 U_i 为:

$$U_i = \frac{UX''_d}{(X''_d + X)} \quad (1-2)$$

可以看出,自同期合闸时的最大冲击电流必然小于发电机出口三相短路时的电流,一般来说发电机是应该经受得起这一冲击电流的。但由于这种并列操作是经常进行的,为了避免由于多次使用自同期产生的积累效应而造成绝缘缺陷,所以应对自同期使用作一定的限制。我国规程中规定:对于一切水轮发电机、同步调相机,以及发电机—变压器组方式连接的汽轮发电机及小容量的汽轮发电机组,只要其绝缘及端部固定情况良好,端部接头无不良现象,均可采用自同期并列方式。但对于容量为3000kW以上与母线直接连接的汽轮发电机,需要通过下列验算才能确定是否能采用自同期并列方式。

这时,要求自同期合闸冲击电流产生的电动力不超过发电机出口三相短路时所产生电动力的一半,以保证安全。按照这一要求,由于电动力与电流平方成正比,所以可用下式表示:

$$\left(\frac{I_{i, cy}}{I''} \right)^2 \leq \frac{1}{2} \quad (1-3)$$

或

$$I_{i, cy} \leq \frac{1}{\sqrt{2}} I'' \quad (1-4)$$

式中 I'' ——发电机出口三相短路电流的周期分量,它可由下式计算:

$$I'' = \frac{E}{X''_d} = \frac{1.05}{X''_d} \quad (1-5)$$

式中 E ——发电机电势。

将上式代入式(1-4),可得:

$$I_{i, cy} \leq \frac{0.74}{X''_d} \quad (1-6)$$

按照式(1-1)所求出的冲击电流 I_{sh} 若能满足式(1-6),便可允许进行自同期并列。
本章只对准同期作介绍,不再讨论自同期。

§ 1-2 准同期并列原理

一、准同期并列的条件

采用准同期并列的条件为:

1. 待并发电机和系统相序相同;
2. 待并发电机和系统的频率相等;
3. 待并发电机电压和并列点的系统侧电压相等;
4. 待并发电机电压和并列点的系统侧电压相位角相等。

下面分析为什么并列时必须满足上述 4 个条件。

如图 1-1(a)所示, G 为待并发电机,其直轴次暂态电抗为 X''_d ,系统用等值发电机 G_s 表示, X_L 为它们之间的联系电抗。设发电机的空载电势等于端电压 U_g ,系统侧电压为 U ,并列点断路器为 DL 。图 1-1(b)为其等值电路。

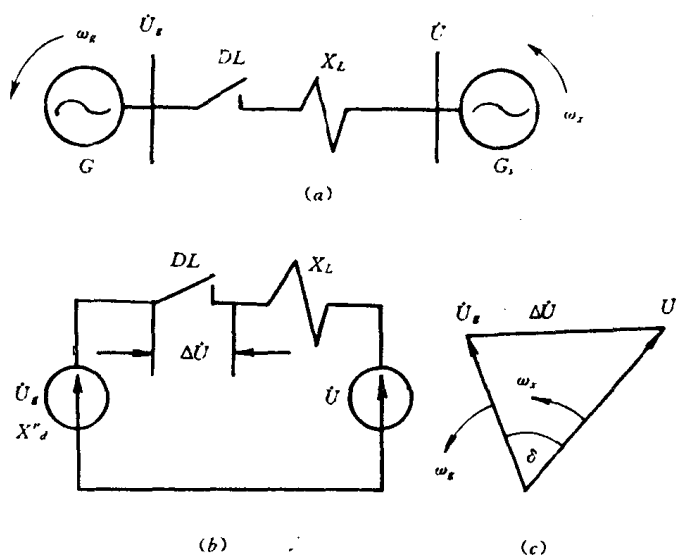


图 1-1 发电机并列示意图

若发电机的角频率为 ω_g ,系统电压的角频率为 ω_s 。当发电机电压与系统电压存在相角差 δ 时,电压矢量图如图 1-1(c)所示。

显然,在 DL 两端存在电压差 ΔU ,由电压三角形不难看出:

$$\Delta U = \sqrt{U_g^2 + U^2 - 2U_g U \cos \omega_s t} \quad (1-7)$$

式中 $\omega_s = \omega_g - \omega_r$, 为滑差角频率。

当 $\delta = \omega_s t, U_g = U$ 时,

$$\Delta U = 2U \sin \frac{\delta}{2} \quad (1-8)$$

实际进行并列操作时,可能有以下偏差及其影响。

1. 存在电压幅值差

若并列时,发电机角频率 ω_g 等于系统角频率 ω_r ; 发电机电压与系统电压相位相等,即相角差 $\delta = 0$; 电压幅值不等,即 $U_g \neq U$ 。

这时有矢量图如图 1-2 所示。

由矢量图可看出,断路器 DL 闭合瞬间,在电压差 ΔU 的作用下,会产生冲击电流 I_m ,此电流为:

$$I_m = \frac{\dot{U} - \dot{U}_g}{X_L + X_d''} = \frac{\Delta \dot{U}}{X_L + X_d''}$$

由于发电机与系统之间的阻抗是感性的,所以当 $U_g < U$ 时, I_m 滞后于 $\Delta \dot{U} 90^\circ$, 如图 1-2(a) 所示。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感性的。当 $U_g > U$ 时,则矢量图如图 1-2(b) 所示。此时冲击电流 I_m 对待并发电机起去磁作用,能促使发电机电压下降趋于系统电压。

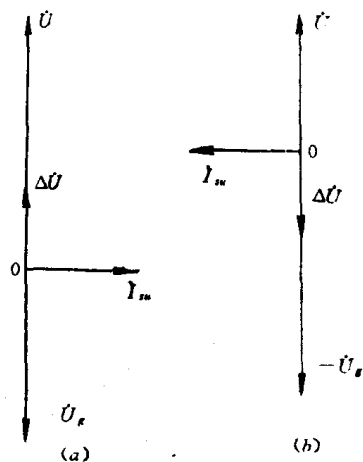


图 1-2 电压不等时的矢量图

通过上述分析可看出当 $U_g \neq U$ 时,会产生冲击电流 I_m ,该电流属于无功电流, I_m 过大,将会引起发电机定子绕组发热以及由之产生的电动力使绕组端部受到损坏。因此,必须限制冲击电流 I_m 。

2. 存在相角差

若并列时,电压幅值相等, $U_g = U$; 频率相等, $f_g = f_r$; 但相位差 $\delta_0 \neq 0$ 。此时相量关系如图 1-3 所示。

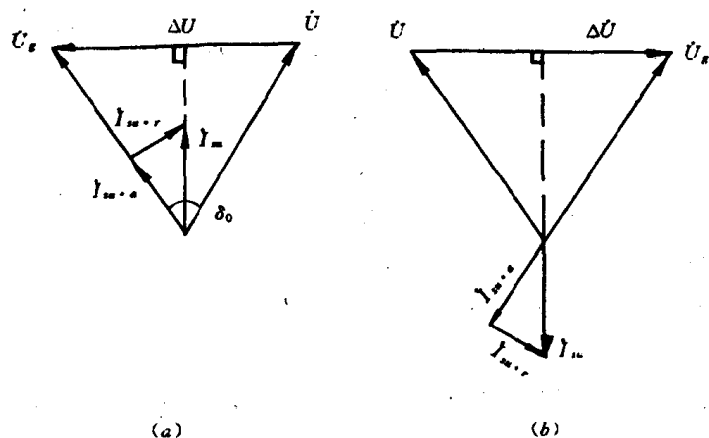


图 1-3 相位不等时的矢量图

若发电机电压相位超前系统电压 δ_0 , 则矢量图如图 1-3(a) 所示。冲击电流 $\dot{I}_w$ 的有功分量 $\dot{I}_{w,a}$ 和发电机电压 $\dot{U}_g$ 同向, 发电机送出有功功率。

若发电机电压相位滞后系统电压 δ_0 , 则矢量图如图 1-3(b) 所示, 冲击电流 $\dot{I}_w$ 的有功分量 $\dot{I}_{w,a}$ 和发电机电压 $\dot{U}_g$ 反向, 发电机吸收有功功率。

并列时, 发电机送出有功功率, 意味着给发电机突然加上制动转矩。发电机吸收有功功率, 意味着发电机突然得到加速转矩。这些突加的转矩, 不管是制动的还是加速的, 都将使机组大轴受到突然应力, 使发电机产生抖动或机械损伤。

此外从矢量图还可看出, 当 $\delta_0 \neq 0$ 时还会产生冲击电流的无功分量 $\dot{I}_{w,r}$ 。

3. 存在频率差

若并列时电压幅值相等, $U_g = U$, 但频率不等, $f_g \neq f_x$ 或 $\omega_g \neq \omega_x$ 。仍参看图 1-1(c), 即使某一瞬间 $\delta_0 = 0$, 由于频率不等, 发电机电压矢量 $\dot{U}_g$ 将相对系统电压矢量 $\dot{U}$ 以 $\omega_r = \omega_g - \omega_x$ 的相对角速度旋转。相角差 $\delta = \omega_r t$ 随着时间增长作周期性变化。在断路器 DL 动静触头两侧出现的电压差 $\Delta \dot{U}$ 也随着 δ 的变化成为一个脉动电压 $\dot{U}_d$ (即 $\Delta \dot{U} = \dot{U}_d$)。若在 $\dot{U}_d \neq 0$ 时合上断路器, 则将有一冲击电流 $\dot{I}_i$ 作用于发电机。该电流将使刚投入系统的发电机带上过多的正有功或负有功功率, 使发电机轴产生振动。当 δ 较小时, 认为 $\dot{I}_i$ 只为有功性质, 当 δ 较大时, 认为 $\dot{I}_i$ 还含有无功性质电流分量。

如果在 $f_g > f$ (即 $\omega_g > \omega_x$) 时并列, 发电机电压向量 $\dot{U}_g$ 超前于系统电压 $\dot{U}$ 。此时发电机向系统送出有功功率, 发电机转子受到制动力矩作用而使 ω_g 减小。若减小到 $\omega_g < \omega_x$, 则 ω_r 为负。 $\dot{U}$ 超前于 $\dot{U}_g$ 时, 发电机向系统吸取有功功率, 转子又受到加速力矩作用。转子经过几次摆动后, 发电机才真正与系统同步。

如果并列时仍有 $\omega_g > \omega_x$, 但 ω_r 较大。在发电机受制动力矩时, 若只使 ω_r 减小而不变号, 则 $\delta = \omega_r t$ 可以继续加大; 在 $180^\circ < \delta < 360^\circ$ 时, 发电机输出功率变负, 即从系统吸收有功功率, 机组更加加速, 从而使发电机失步。

从上述分析可看出, 同期并列时若不满足同期的 3 个条件, 就会产生程度不同的危害。因此同期并列必须满足同期的 3 个条件。

一般将 $\omega_g = \omega_x$, $U_g = U$, $\delta_0 = 0$ 这 3 个条件称为并列的理想条件。满足理想条件, 就可保证并列时冲击电流为零。事实上, 并列时完全满足上述条件是困难的。实践证明, 若

$$\text{电压差 } \Delta U \% = \frac{U_g - U}{U} \times 100 \% \leq \pm (5 \sim 10) \%$$

$$\text{频率差 } S = \frac{\omega_g - \omega_x}{\omega_x} \times 100 \% \leq (0.2 \sim 0.5) \%$$

$$\text{相角差 } \delta = \varphi_g - \varphi = \omega_g t - \omega_x t = \omega_r t = \pm 10^\circ$$

(式中的 φ_g 、 φ 分别为待并机和系统电压的相位) 则并列时造成的不良影响是允许的。上述 3 个条件称为并列的实际条件。

必须注意: 在进行同期并列时, 应首先检查相序, 只有在相序相同的情况下, 才能进行并列。这对新安装的发电机和发电机检修后尤其须特别注意, 否则将永远不能同期或发生严重事故。

下面以手动准同期来说明并列过程: 同期并列时, 调整待并发电机的电压和频率使之与系

统电压和频率基本相等,在相位差到达零之前某一时间,发出合闸信号,从而完成并列。电压及频率的调整以及发合闸命令均由运行人员来完成。

为了顺利完成手动准同期操作,一般电厂内装有同步仪表,用来检测 ΔU 、 ω 和 δ 。在我国常见的同步表有多种型式,其中 MZ-10 型组合式同步表近年使用的比较广泛。关于它的结构及原理见本章附录。

二、脉动电压的分析

若能找到一个包含同步三条件信息的电量,则可以此作为实现准同期条件的依据。而从并列点的断路器 DL 两侧取得的脉动电压 U , 即满足这一条件。 U 又称整步电压,这实际就是式 (1-7) 的 ΔU 。对 U , 讨论如下。

设图 1-1(a) 中待并发电机电压的瞬时值为:

$$u_g = U_{gm} \sin \omega_g t$$

系统侧电压的瞬时值为:

$$u = U_m \sin \omega_x t$$

式中 U_{gm} 、 U_m 分别为 u_g 、 u 的幅值。

我们将 $u_s = u_g - u = U_g \sin \omega_g t - U_m \sin \omega_x t$ 称为脉动电压。若 $U_{gm} = U_m$, 则:

$$\begin{aligned} u_s &= U_m \sin \omega_g t - U_m \sin \omega_x t \\ &= 2U_m \sin \frac{\omega_g - \omega_x}{2} t \cos \frac{\omega_g + \omega_x}{2} t \end{aligned} \quad (1-9)$$

以 $\omega_s = \omega_g - \omega_x$ 代入式 (1-9) 中得:

$$u_s = 2U_m \sin \frac{\omega_s}{2} t \cos \frac{\omega_g + \omega_x}{2} t \quad (1-10)$$

式中 ω_s 为滑差角频率。

将 u_s 随时间变化的波形画出, 如图 1-4 所示。

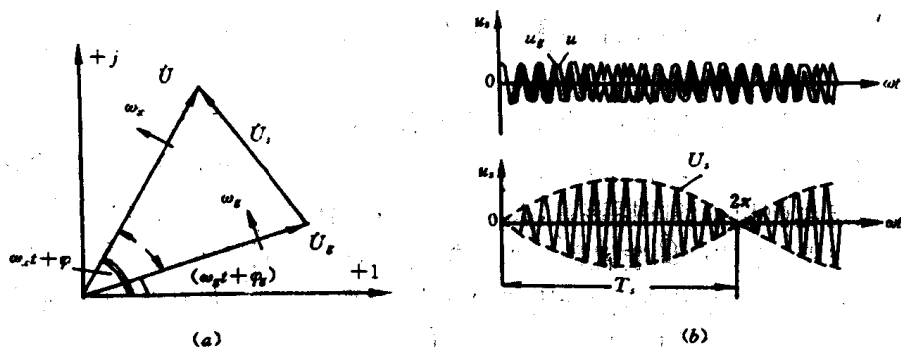


图 1-4 脉动电压

(a) 矢量图 (b) 波形图

因为并列时已将待并机频率调整得与系统频率接近, 因此, 上式中 ω_s 很小, 对应式 (1-10)