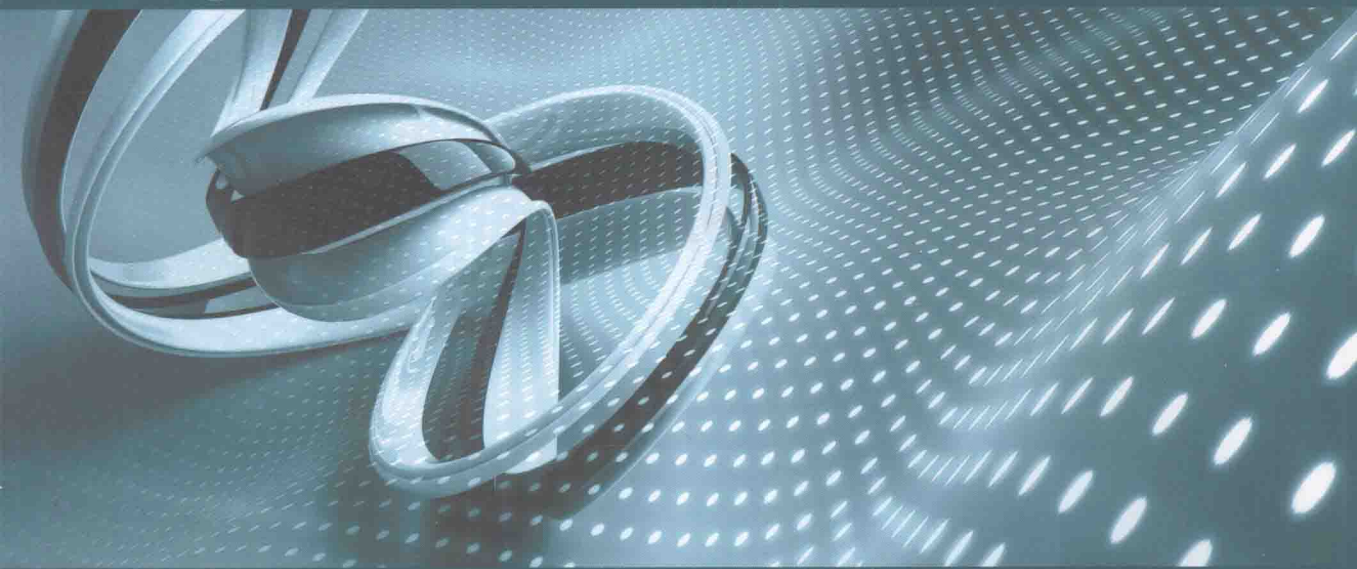




普通高等教育“十二五”规划教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



电气工程及其自动化专业（研究型系列）

电力系统自动化 (第三版)

王葵 孙莹 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电力系统自动化

(第三版)

王 葵 孙 莹 编
万秋兰 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材，普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书主要内容包括发电机的自动并列、同步发电机励磁自动控制系统、电力系统频率及有功功率的自动调节、电力系统电压调整和无功功率控制技术、电力系统调度自动化、配电管理系统(DMS)等，力求使学生对电力系统自动化及其基本问题有一个基础性的了解，在内容上重视基本概念、基本原理的讲解，对具体的自动装置不作典型介绍，简化原有教材中某些典型控制装置的具体动作及原理的分析讨论。本书跟踪电力系统成熟的新技术、新原理，在第二版的基础上，增加了励磁系统控制仿真、功率频率控制系统模型与仿真，以及数字化变电所的有关内容。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化专业及相关专业的本科教材，也可作为成人(函授)高等教育、高职高专教育的教材，还可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统自动化/王葵，孙莹编. —3版. —北京：中国电力出版社，2012.3

普通高等教育“十二五”规划教材 普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5123-2796-2

I. ①电… II. ①王…②孙… III. ①电力系统—自动化—高等学校—教材 IV. ①TM76

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第039713号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2004年4月第一版

2012年5月第三版 2012年9月北京第十四次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 13.75印张 330千字

定价 25.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

作为电力工程及其自动化专业的主干课程，本书力求使学生对电力系统自动化及其基本问题有一个基础性的了解。因此，本书在编写过程中，重视基本概念、基本原理的讲解，对具体的自动装置不做典型介绍，简化原教材中某些典型控制装置的具体动作及原理的分析讨论。例如自动准同期装置，本书只介绍框图和波形，不讲解电路。自动调节励磁装置也是一样，只涉及原理的分析讨论时，才保留部分电路。还有一些内容，例如有关晶闸管方面的知识，在电力电子课程中已做详细的讨论，本书也将这部分内容略去。电力系统的频率及有功控制部分，加入了自动发电量控制和经济调度的内容。

本书跟踪电力系统成熟的新技术、新原理，在第二版的基础上增加了励磁系统控制仿真、功率频率控制系统模型与仿真，以及数字化变电所的有关内容。编写中力求重点介绍整个系统的总体构成及基本功能，而有关 EMS 及 DMS 本身设计、开发的内容则不做详细讨论，使学生对 EMS 及 DMS 有一个总体的了解，便于将来在工作中能够尽快地做到理论与实践相结合。<http://jc.cepp.sgcc.com.cn> 提供本教程电子教案下载。

在本书编写的具体工作中，得到了各方面的大力支持与帮助，特别是担任本书第一、二版主审的山东大学潘贞存教授及担任第三版主审的东南大学万秋兰教授，研究生孙英涛、董学静、王珊珊帮助做了大量的录入和校对工作，研究生战杰帮助制作了课件。在此一并表示衷心的感谢。

本书中存在的缺点与错误，望读者批评指正。

编 者

2012.03

目 录

前 言

绪论	1
第一章 发电机的自动并列	4
第一节 概述	4
第二节 准同期并列的基本原理	8
第三节 恒定越前时间并列装置	12
第四节 数字式并列装置	17
第二章 同步发电机励磁自动控制系统	23
第一节 概述	23
第二节 同步发电机励磁系统	30
第三节 励磁系统中转子磁场的建立和灭磁	33
第四节 励磁调节器原理	38
第五节 励磁系统稳定器	52
第六节 电力系统稳定器	59
第七节 励磁控制系统仿真	63
第三章 电力系统频率及有功功率的自动调节	70
第一节 电力系统的频率特性	70
第二节 调频与调频方程式	77
第三节 电力系统的经济负荷分配	85
第四节 电力系统低频减载	92
第五节 功率频率控制系统的模型与仿真	99
第四章 电力系统电压调整和无功功率控制技术	114
第一节 电力系统电压控制的意义	114
第二节 电力系统无功功率平衡与电压的关系	115
第三节 电力系统电压控制的措施	119
第四节 电力系统电压的综合控制	127
第五节 电力系统无功功率电源的最优控制	128
第五章 电力系统调度自动化	131
第一节 概述	131
第二节 远方终端 RTU	137
第三节 数据通信的通信规约	141
第四节 调度中心的计算机系统	153
第五节 自动发电控制	156
第六节 EMS 的网络分析功能	161

第六章 配电管理系统 (DMS)	179
第一节 配电管理系统 (DMS) 概述	179
第二节 馈线自动化 (FA)	182
第三节 负荷控制技术及需方用电管理 (DSM)	187
第四节 配电图资地理信息系统 (AM/FM/GIS)	191
第五节 远程自动抄表计费系统	193
第七章 变电所综合自动化和数字化变电所	197
第一节 变电所综合自动化	197
第二节 数字化变电所	202
参考文献	211

绪 论

现在,电能已经成为关系国计民生的主要能源。一个完整的电能生产与消费网络由发电、输电、配电及用电等几部分组成,其中配电及用电部分不属本专业的范畴,因此本书所指的电力系统只限于由发电厂、变电所及输电线路组成的电力网络,如图0-1所示。由于一个电力系统中所包含的厂、所及线路的数量很大,达数百个,且纵横连线,在控制系统的分类中,它属于“复杂系统”;而且分布辽阔,大者达千多公里,小的也有几百公里,加上电能在生产与销售过程中的不可大量储藏性,因此又是很有特点的复杂系统。它不但要求每一时刻发出的总电能等于系统消费的总电能,而且要求所有的中间传输环节都畅通无阻,使发出的电能有秩序地输送开来,耗尽无疑。对于电力系统,除了发不敷求会使部分用户停电,造成用户的损失外,就是中间传输环节的任何阻滞,会在发电与用电两端同时发生“过剩”与“不足”两种截然相反的不正常状态,无论这种阻滞是人为的还是外界因素造成的设备故障,严重时系统可能因此而解列、崩溃,造成大面积恶性停电,使国民经济遭受重大损失。因此,为了保证电力系统可靠、安全地连续供电,电力系统都设有调度所,负责各厂、所间电能生产及(各厂、所之间虽有功率的交流却并不需要信息的有效交换)电能传输的调度与管理(如图0-1虚线所示)。调度所与厂、所之间只有运行数据信息的交换,而没有功率的交流,是电力系统中的软环节。电力系统自动化就是为电力系统的安全、可靠及经济地运行服务,目的性是十分明确的。与其他复杂系统的自动控制相仿,电力系统的自动化也是分层实现的。

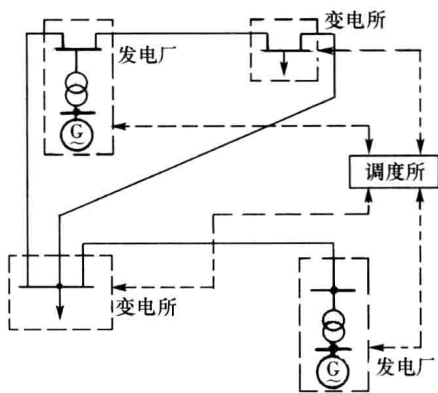


图0-1 电力系统示意图

图0-2表示复杂系统的分层控制示意图。第一层是直接控制器。直接控制器从被控制设备直接获取运行状态信息,并按给定值或给定规律控制这些信息(可以是开环顺控的,但一般是指经反馈后闭环的),进而达到直接控制生产过程的目的。直接控制器是复杂系统控制的基础设施,其结构可靠,动作迅速,效果直接且明显,是数量最多,普遍应用的一类自动装置。在复杂系统的自动控制方案中,只要条件许可,一般都尽量采用直接作用的控制装置。分层控制的第二层是监督功能层,它表示直接控制器还应具备对被控设备的监督功能,包括越限报警、越限紧急停车、阻止越限运行及紧急启动等。监督功能一般由设在直接控制器中的专门部件执行,其整定值则根据制造厂或上级技术管理机构的规定来确定。第三层是寻优功能层。寻优功能指的自寻稳态最优解的功能。稳态最优解一般在多个设备并行工作时出现,最优解的结果一般作为控制器的给定值。第四层是协调功能层。协调是指在全系统范围内的协调。根据其工作条件与要求,复杂系统内的应控设备分别采用直接控制及监督与寻优的分层处理后,剩下的就是要在全系统内进行协调处理的内容,线索较为清晰,需要协调

的内容也大为减小,使协调功能能够实时地进行,协调的结果应该是寻优功能的依据。图中的第五层为经营与管理层,并表示它把全系统的技术运行状态与经营依据,如市场、原料、人员及其素质、计划安排等进行综合分析,用以指导系统的协调功能。

电力系统的自动化是结合了电力系统运行的特点,按照复杂系统控制的一般规律分层实现的。实现电力系统自动化所需的电力系统方面的基础知识,在电力系统课程中讨论;所需的控制理论方面的基础知识,则在自动控制理论课程中讨论。本书是在这些知识的基础上,对电力系统自动化重点性控制设备的基本动作原理进行分析与讨论,以使读者对电力系统自动化及其基本问题有一个基础性的了解。

根据教学大纲的要求,本书共分七章。

第一章讲发电机同步并列的自动化原理。这是将同步发电机一台台投入系统进行并列运行,以组成电力系统的基本步骤。第二章讲电力系统励磁自动控制系统,主要讲发电机端电压的自动调整。根据电力系统运行的特点,无功功率必须平衡才能达到电压稳定,满足电能质量在这方面的要求,而我国电网运行规程又规定无功功率要力争做到“分层、分级就地平衡”,所以自动电压调节属于图 0-2 中直接控制器的功能;而第一章的自动并列装置是设有

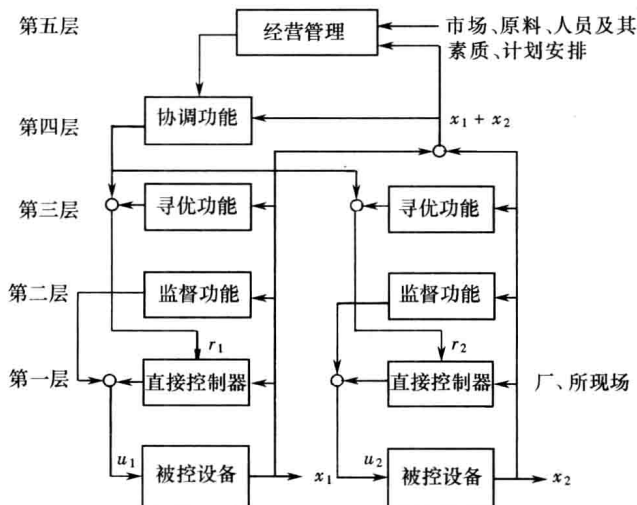


图 0-2 复杂系统的分层控制示意图

较多的监督功能的控制器,以避免越限并列。由于这两种自动化设备均装设在厂、站现场,动作时不需要其他设备的信息,一般称它们为电力系统常规自动装置。第三章讲电力系统频率和有功功率的调节。频率是电能质量的重要指标,有功功率调整是电力系统经济运行和系统运行方式的重要问题。本章就电力系统的频率特性和调频的有关问题展开讨论,阐述了经济调度和自动调频的问题。还讲述了按频率自动减负荷装置的动作原理,这是一种较为典型的反事故自动装置,装设在部分变电所,但它的整定

值则要经过全系统的协调确定。由于它的动作特点,本书仍将它视为常规自动装置。它至今仍是电力系统重要而有效的反事故措施。第四章讲电力系统电压调整和无功功率控制技术。频率的调整集中在发电厂进行调频控制,且全系统频率相同;而电压水平在全系统各点不同,并且电压控制可分散进行,调节控制电压的手段也多种多样。本章就电力系统电压控制的措施、电压的综合控制及无功电源的最优控制展开讨论,阐述了电压控制的意义和方法。第五、六、七章均讲图 0-1 中所示调度所、变电所、馈线的自动化问题。它是基于计算机技术及通信技术的发展而兴起的现代电力系统的综合自动化系统及数字化变电所。图 0-2 表示的自动控制系统的寻优与协调的基本原理,都属于调度自动化章节中的内容。第五章对电力系统调度自动化的历史进行了回顾,说明了其控制系统的构成及基本任务,介绍了能量管理系统(EMS)的基本监视与控制功能以及能量管理级功能和网络分析级功能。第六章讲配电自动化系统。配电管理系统(DMS)是根据能量管理系统的技术而发展的,主要针

对配电和用电系统。它的主要任务有：调度自动化系统、变电所自动化系统、馈线自动化系统（FA）、自动制图（AM）/设备管理（FM）/地理信息系统（GIS）、用电管理自动化系统、配电系统运行管理自动化系统、配电分析软件（DPAS）等。第七章讲变电所综合自动化系统，它是变电所内的综合自动化，实现了对变电所传统的继电保护、控制方式、测量手段、通信和管理模式的全面变革。

本书对电力系统应有的控制功能都进行了讨论，因而可以使读者对电力系统自动化有较为全面的基本了解。

第一章 发电机的自动并列

第一节 概 述

一、并列操作的意义

电力系统运行中,任一母线电压瞬时值可表示为

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

式中 U_m ——电压幅值;

ω ——电压的角速度;

φ ——初相角。

式(1-1)反映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,须对待并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,大型机组不恰当地并列操作将导致严重后果。因此,对同步发电机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现实意义。

同步发电机组并列时遵循如下的原则。

(1) 并列断路器合闸时,冲击电流应尽可能的小,其瞬时最大值一般不宜超过1~2倍的额定电流。

(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,以减少对电力系统的扰动。

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。

在电力系统正常运行情况下,一般采用准同期并列方法将发电机组投入运行。因此,这种方法是本书主要介绍的内容。自同期并列方法已很少采用,只有当电力系统发生事故时,为了快速的投入水轮发电机组,过去曾采用自同期并列方法。随着自动控制技术的进步,现在也可用准同期的方法快速投运水轮发电机组。因此,对自同期并列方法本书只介绍它的一般原理。

二、准同期并列

设待并发电机组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。这里需要说明的是, 发电机三相电压 $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ 与系统三相电压 $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ 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 主触点间具有电压差 $\dot{U}_s$, 其值可由图 1-1 (b) 的电压相量图求得。

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 , 它们间的相量差 $\dot{U}_G - \dot{U}_x$ 为 $\dot{U}_s$ 。计算并列时冲击电流的等值电路如图 1-1 (c) 所示。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 $\dot{U}_s$ 应尽可能的小, 其最大值应使冲击电流不超过允许值。最理想的情况是 $\dot{U}_s$ 的值为零, 这时 QF 合闸的冲击电流也就等于零; 并且希望并列后能顺利进入同步运行状态, 对电网无任何扰动。

综上所述, 发电机并列的理想条件为并列断路器两侧电源电压的三个状态量全部相等, 即图 1-1 (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

$$\left. \begin{aligned} f_G &= f_x \text{ 或 } \omega_G = \omega_x, \text{ 即频率相等 } (\omega_G = 2\pi f_G, \omega_x = 2\pi f_x) \\ U_G &= U_x, \text{ 即电压幅值相等} \\ \delta_e &= 0, \text{ 即相角差为零} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

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, 不发生任何扰动现象。可以设想, 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。

但是, 实际运行中待并发电机组的调节系统并不按式 (1-2) 的理想条件调节, 因此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拉入同步运行, 对待并发电机和电网运行的影响较小, 不致引起任何不良后果。

因此, 在实际并列操作中, 并列的实际条件允许偏离式 (1-2), 其偏离的允许范围则需经过分析确定。下面分析同步发电机组并列时状态量偏离式 (1-2) 的理想条件时所引起的后果。

(一) 电压幅值差

设发电机并列时的电压相量如图 1-2 (a) 所示, 即并列时: ①发电机频率 f_G 等于电网频率 f_x ; ②相角差 δ_e 等于零; ③电压幅值不等, $U_G \neq U_x$ 。在上述条件下, 冲击电流最大瞬时值为

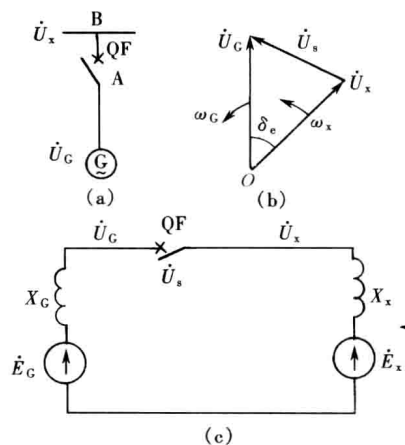


图 1-1 准同期并列

(a) 电路示意图; (b) 相量图;
(c) 等值电路图

$$i''_{h\cdot\max} = \frac{1.8\sqrt{2}(U_G - U_x)}{X''_d} = \frac{2.55U_s}{X''_d} \quad (1-3)$$

式中 U_G 、 U_x ——发电机电压、电网电压有效值；

X''_d ——发电机直轴次暂态电抗。

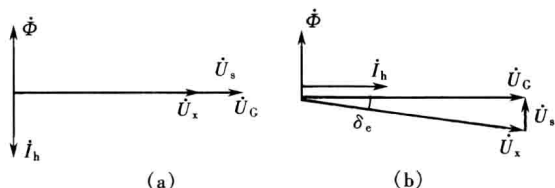


图 1-2 准同期条件分析

(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 $\dot{I}_h$ 与 $\dot{U}_G$ 夹角为 90° ，所以由电压幅值差产生的冲击电流 $\dot{I}_h$ 主要为无功冲击电流。

冲击电流的电动力对发电机绕组产生影响，由于定子绕组端部的机械强度最弱，所以须特别注意对它所造成的危害。由于并列操作为正常运行操作，冲击电流最大瞬时值

限制在 1~2 倍额定电流以下为宜。为了保证机组的安全，我国曾规定压差并列冲击电流不允许超过机端短路电流的 $1/20 \sim 1/10$ 。据此，得到准同期并列的一个条件为电压差 U_s 不能超过额定电压的 $5\% \sim 10\%$ 。现在一些巨型发电机组更规定在 0.1% 以下，即要求尽量避免无功冲击电流。

(二) 合闸相角差

设并列合闸时，断路器两侧电压相量如图 1-2 (b) 所示，即：①发电机频率 f_G 等于电网频率 f_x ；②合闸瞬间存在相角差，即 $\delta_e \neq 0$ ；③电压幅值相等， $U_G = U_x$ 。

这时发电机为空载情况，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为

$$i''_{h\cdot\max} = \frac{2.55U_x}{X''_q} \cdot 2\sin \frac{\delta_e}{2} \quad (1-4)$$

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，当 δ_e 很小时，可认为 $\dot{I}_h$ 与 $\dot{U}_G$ 夹角为 0° ，所以由电压幅值差产生的冲击电流 $\dot{I}_h$ 主要为有功冲击电流。

当相角差较小时，冲击电流主要为有功电流分量，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 $\dot{U}_s$ ，若 $\dot{U}_G$ 与 $\dot{U}_x$ 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。

(三) 频率不相等

1. 频差、滑差、滑差周期

设待并发电机的电压相量如图 1-3 所示，且有 $U_G = U_x$ ，电压幅值相等；当频率不相等即 $f_G \neq f_x$ ，两者的频率差是一项很重要的参数，用频差 f_s 表示，即 $f_s = f_G - f_x$ 。

当两个交流电压的频率不等（但较接近）时，一般可用两个有相对旋转速度的相量来表示它们，如图 1-3 所示。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，一快一慢，两者间的电角频率之差称为滑差角频率，简

称滑差, 用 ω_s 表示。于是得 $\omega_s = \omega_G - \omega_x$, 很显然, ω_s 是有正负值的, 其方向与所规定的参考相量有关。图 1-3 中, 以系统电压 $\dot{U}_x$ 为参考相量, 于是 $\omega_G > \omega_x$ 时, $\omega_s > 0$; 当 $\omega_G < \omega_x$ 时, $\omega_s < 0$ 。反之, 若以 $\dot{U}_G$ 为参考相量, 则 ω_s 的方向恰好相反。

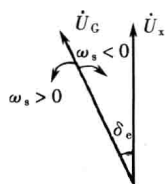


图 1-3 滑差电压原理图

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, 它们是描述两电压相量相对运动快慢的一组数据。

频差 f_s 、滑差 ω_s 和滑差周期 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”。加速或减速力矩会对机组造成冲击。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 10~16s 之间。

2. 频率不相等对待并发电机的影响

图 1-4 为待并发电机组进入同步运行的暂态过程分析示意图。

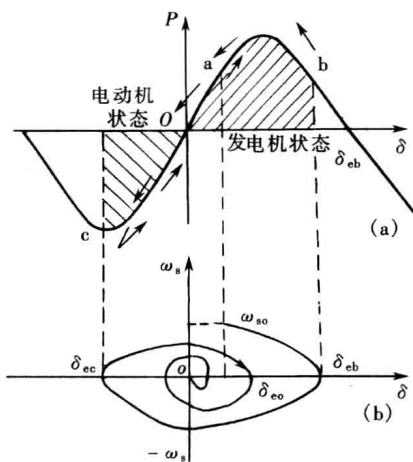


图 1-4 待并发电机组进入同步运行的暂态过程分析示意图

众所周知, 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 $\dot{U}_G$ 落后 $\dot{U}_x$ 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。

下面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_s 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 (回顾图 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曲线变动到 $\omega_G = \omega_x$ (图 1-4 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, 重复前面的摆动过程, 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时为止。

显然, 进入同步状态的暂态过程与合闸时滑差角频率 ω_{s0} 的大小有关。当 ω_{s0} 较小时, 到达最大相角 b 点时的 δ_{eb} 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, 暂态过程短。

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于电网频率,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的条件下,首先合上并列断路器 QF,接着立刻合上励磁开关 KE,给转子加上励磁电流,在发电机电势逐渐增长的过程中,由电力系统将并列的发电机组拉入同步运行。

自同期并列最突出优点是控制操作非常简单,限于当时控制技术水平,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迅速把备用机组投入电网运行,所以曾一度广泛应用于水轮发电机组,作为处理系统事故的重要措施之一。

自同期并列方式不能用于两个系统间的并列操作。同时应该看到当发电机以自同期方式投入电网时,在投入瞬间,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,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决定于系统的情况,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。

另外,必须指出,发电机母线电压瞬时下降对其他用电设备的正常工作将产生影响,为此,自同期并列法也受到限制,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,前已述及,只要控制得当就可使冲击电流很小,且对电网扰动甚微。因此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流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) $\dot{U}_G$ 与 $\dot{U}_x$ 两电压幅值相等

为便于分析问题,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 ω_G 与 ω_x 不等,因此 $\dot{U}_G$ 与 $\dot{U}_x$ 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

$$u_s = U_G \sin(\omega_G t + \varphi_1) - U_x \sin(\omega_x t + \varphi_2)$$

设初始角 $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$, 并应用和差化积公式得

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

令 $u_s = 2U_G \sin\left(\frac{\omega_G - \omega_x}{2}t\right)$ 为电压 u_s 的幅值,则

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

由式(1-6)可知, u_s 波形可以看成是幅值为 U_{sm} 、频率接近于工频的交流电压波形。

又 $\omega_s = \omega_G - \omega_x$ 为滑差角频率。两电压相量间的相角差为

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

于是

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

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 $\dot{U}_x$ 固定, 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 。

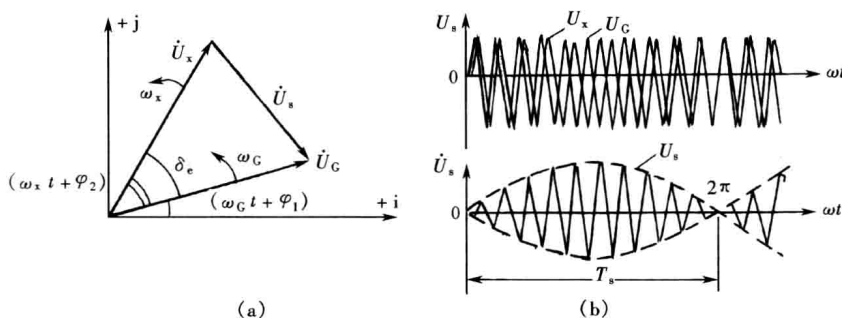


图 1-5 脉动电压

(a) 相量图; (b) 波形图

(二) $\dot{U}_G$ 与 $\dot{U}_x$ 两电压幅值不相等

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

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

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

当 $\omega_s t = \pi$ 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。由于脉动周期 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。

(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——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发出时间。脉动电压 u_s 有时也称作滑差电压。

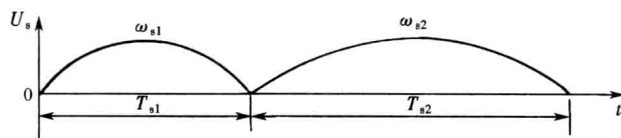
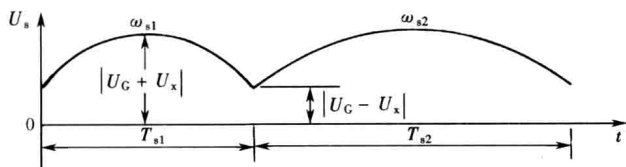


图 1-6 $U_G = U_x$ 时 U_s 的波形

图 1-7 U_G 与 U_x 不等时 U_s 的波形

1. 电压幅值差

电压幅值差 $|U_G - U_x|$ 为对应于脉动电压 $\dot{U}_s$ 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 的关系有

$$\omega_s = 2\pi f_s$$

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。

例如, 设滑差角频率的允许值 ω_{sy} 最大为 0.2%, 即

$$\omega_{sy} \leq 0.2 \times \frac{2\pi f_N}{100} = 0.2\pi (\text{rad/s})$$

对应的脉动电压周期 T_s 的值为

$$T_s \geq \frac{2\pi}{\omega_{sy}} = 10(\text{s})$$

所以 U_s 的脉动周期 T_s 大于 10s 才满足 ω_{sy} 小于 0.2% 的要求。这就是说测量 T_s 的值可以检测待并发发电机组与电网间的滑差角频率 ω_s 的大小, 即频率差的大小。

3. 合闸相角差 δ_e 的控制

前面已经提及, 最理想的合闸瞬间是在两电压相量 $\dot{U}_G$ 与 $\dot{U}_x$ 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。它的任务是检测 $\dot{U}_G$ 与 $\dot{U}_x$ 间的滑差角频率 ω_s , 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, 且调节发电机电压 $\dot{U}_G$, 使它与 $\dot{U}_x$ 间的电压差值小于规定的允许值, 促使并列条件的形成。

(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 δ_e 等于零的时刻, 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以下几种装置。

(1) 半自动准同期并列装置。这种并列装置没有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信号由该装置经判断后自动发出,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。

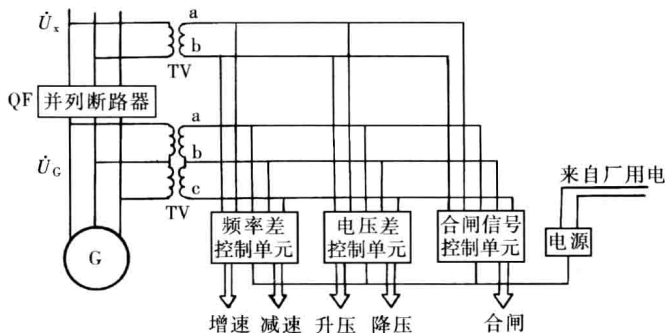


图 1-8 自动准同期并列装置组成示意图

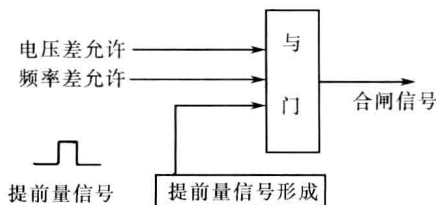


图 1-9 准同期并列合闸信号控制装置的逻辑结构框图

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。其控制原则是在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。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。

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_{QF} 和自动准同期装置的动作时间 t_c 之和,则有

$$t_{YJ} = t_c + t_{QF} \quad (1-10)$$

式中 t_c ——自动准同期装置的动作时间;

t_{QF} ——并列断路器的合闸时间。

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。

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 δ_e 等于零之前的恒定时间 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

$$\omega_{s1} > \omega_{s2} > \omega_{s3}$$

所以 $\delta_{YJ1} > \delta_{YJ2} > \delta_{YJ3}$

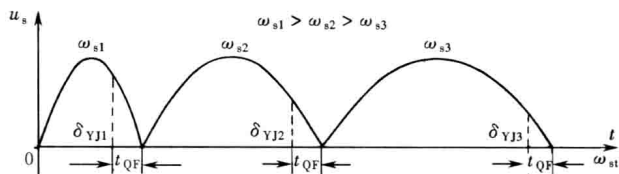


图 1-10 恒定越前时间原理