



普通高等教育“十二五”规划教材

电力系统自动化

丁坚勇 胡志坚 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

电力系统自动化

丁坚勇 胡志坚 编
张保会 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。

全书共分为七章,分别论述了同步发电机自动并列与励磁自动控制、电力系统电压无功控制、电力系统频率和有功功率自动调节、电网调度自动化、配电自动化技术、电力系统安全自动装置等内容。本书紧密结合当前电力发展动向,并介绍了相关的新技术、新概念。本书文字简练、通俗易懂,每章配以思考题,便于自学。

本书可作为高等院校电气工程及相关专业的本科教材,也可作为相关专业专升本学生使用,同时可作为从事电力自动化系统的设计、开发、运行、维护工作的技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统自动化/丁坚勇,胡志坚编. —北京:中国电力出版社, 2015.3

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-7272-6

I. ①电… II. ①丁…②胡… 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(2015)第038375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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015年3月第一版 2015年3月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 16.75印张 410千字

定价 34.00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

“电力系统自动化”是高校本科电气工程及自动化的专业主干课程之一。作者在多年讲授“电力系统自动化”课程的实践中积累了一定的教学经验和资料，自编了授课教案和课件，这是本教材的基础。本书力求能密切结合电力系统实际及其发展，较全面展现电力系统自动化的内容。着重描述电力系统自动化的基本概念、基本原理和实现技术，也注意反映电力系统自动化技术的新进展，如电网调度能量管理系统、分布式发电与微电网控制、智能变电站等。

本书对电力系统自动化的主要内容作了较全面的介绍，对各类自动化系统、设备的基本结构、基本工作原理和自动化控制过程进行分析与讨论，以使读者对电力系统自动化主要内容、基本原理、结构以及发展有较系统、清晰的了解和认识。本书所涉及的电气设备和电力系统方面的基础知识，应已在“电路”、“电气工程基础”等课程中学习；有关电机和控制设备的基本原理和结构的知识，应已在“电机学”、“模拟及数字电子电路”等课程中学习；所涉及的控制理论方面的基础知识，则应已在“自动控制理论”课程中学习。

全书共分为七章，分别论述了同步发电机自动并列和励磁自动控制、电力系统频率和有功功率自动调节、电力系统调度自动化和 EMS、配电自动化技术、电力系统安全自动装置等内容。第一、二、三、五章、第四章第一节、第六章第八节和各章思考题由武汉大学丁坚勇教授编写，第七章、第六章第一至七节和第四章第二至四节由武汉大学胡志坚教授编写；研究生王小鑫、李珺参与了书稿校对整理工作。全书由丁坚勇教授统稿。教材内容较多，当计划学时安排较少时，难以在规定的学时内讲授完全部内容，建议第五至七章可以只选讲部分小节。

本书承蒙西安交通大学张保会教授主审，提出了许多宝贵的意见和建议，谨此致以衷心的感谢。另外，还特别感谢本书参考文献中的各位作者。

限于编者水平，书中难免存在缺点与疏漏，还望读者见谅并批评指正。

编者

2015 年 1 月

目 录

前言

第一章 电力系统自动化概述	1
思考题	6
第二章 同步发电机自动并列	7
第一节 电力系统并列概述	7
第二节 准同期并列检测基本原理	11
第三节 模拟式自动准同期装置	15
第四节 微机型自动准同期装置原理	22
思考题	27
第三章 同步发电机励磁自动控制及电力系统电压无功控制	28
第一节 励磁系统的主要任务及其基本要求	28
第二节 同步发电机励磁系统	35
第三节 励磁系统中的整流电路	40
第四节 自动励磁调节器基本原理	47
第五节 励磁调节与并联运行机组间无功功率的分配	61
第六节 同步发电机微机励磁控制	64
第七节 电力系统电压和无功功率控制	68
思考题	79
第四章 电力系统频率和有功功率自动调节	81
第一节 电力系统频率特性和频率调节	81
第二节 同步发电机调速器及其建模	88
第三节 电力系统频率和有功功率自动控制的基本原理	93
第四节 自动发电控制 (AGC)	98
思考题	105
第五章 电网调度自动化	106
第一节 概述	106
第二节 远方终端 RTU	117
第三节 信息传输和通信规约	122
第四节 电网调度中心计算机系统	140
第五节 SCADA/EMS 系统	144
思考题	164
第六章 配电自动化技术	166
第一节 配电管理系统概述	166
第二节 馈线自动化技术	170

第 5 章 全功率换流器驱动风力发电机组的原理及建模	72
5.1 概述	72
5.2 全功率驱动的风力发电机组的原理	73
5.3 直驱式永磁同步风力发电机组	77
5.4 全功率换流器驱动的异步风电机组	85
5.5 仿真算例	88
第 6 章 风力发电对电力系统的影响	94
6.1 概述	94
6.2 风电并网特点及基本参数	95
6.3 风电并网对电力系统的局部影响	97
6.4 风力发电并网对电力系统全系统范围的影响	103
6.5 仿真算例	107
第 7 章 电网扰动情况下变速风力发电机组控制技术	120
7.1 概述	120
7.2 PMSG 的低电压穿越技术	121
7.3 DFIG 在电网电压不平衡时的控制	125
7.4 仿真算例	130
第 8 章 电网友好型风力发电机组控制技术	134
8.1 概述	134
8.2 风力发电机组的动态无功补偿	134
8.3 虚拟惯性控制	138
8.4 对系统功率振荡的阻尼控制	145
8.5 仿真算例	150
第 9 章 基于 VSC - HVDC 的风电场联网	166
9.1 概述	166
9.2 VSC - HVDC 的建模	171
9.3 VSC - HVDC 的控制策略	173
9.4 多端电压型直流输电	179
9.5 多风电场通过 VSC - MTDC 联网及功率外送仿真	185
附录	191

第一章 电力系统自动化概述

电力系统是由进行电能生产、变换、输送、分配、消费的各种设备按照一定的技术要求有机联系,组成的统一的系统。电力系统为现代社会提供强大、便捷的能源,其重要性比以往更加突出并为人们所认识。电力系统自动化是以电力系统(一次系统)及其电气主设备为控制对象的自动化,是自动化的一种具体形式。

一、电力系统概念

电力系统是一个非常复杂的大系统。电力系统中的各类发电厂,主要有火力发电厂、水力发电厂、核电厂等,将燃料、水力、核能等一次能源转变为电能,再通过高压变电站、输电线路、低压变电站、配电线路变换、传输并分配到各个用电设备,完成由一次能源生产电能、输送电能、再使用电能的过程。这些生产、变换、输送、分配、消费电能的发电机、变压器、电力线路和用电设备联系在一起的整体就是电力系统,又称为一次系统。为了保证电力系统安全、经济、可靠运行和保证电能质量,在电力系统中还必须有信号监测、继电保护、调度控制、自动装置等设备,它们也是电力系统中不可缺少的部分,通常称为二次系统。若再计及电力系统中发电机的原动力设施,如水电厂的水轮机和水库,火电厂的锅炉、汽轮机和热力管道等,与电力系统共同组成动力系统。而电力系统中输送和分配电能的变压器和电力线路构成电力网。动力系统、电力系统、电力网示意图如图 1-1 所示。

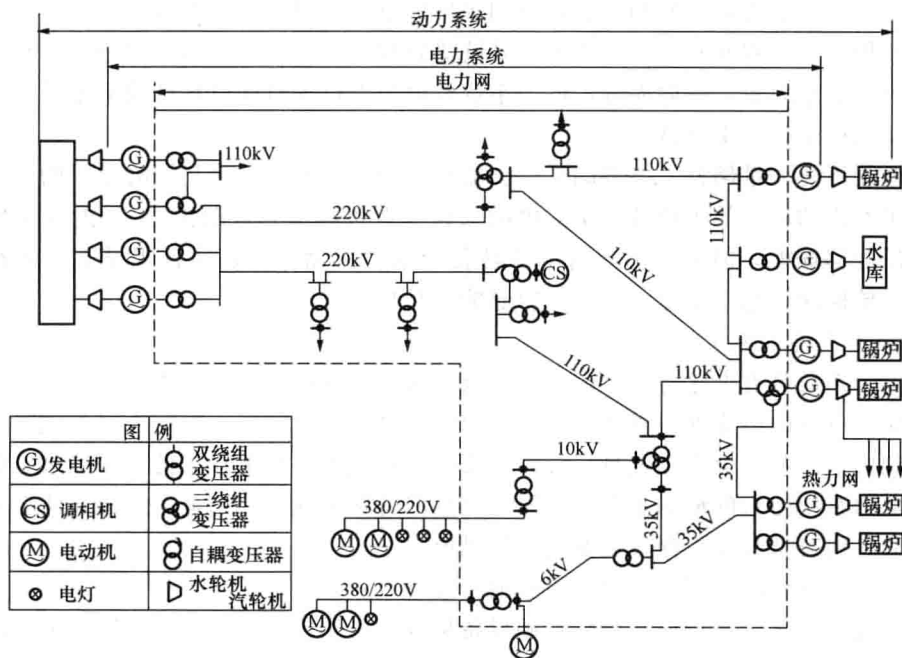


图 1-1 动力系统、电力系统、电力网示意图

二、电力系统特点和基本要求

1. 电力系统特点

电力系统与其他工业系统相比较,有以下特点:

(1) 与国民经济、人民日常生活联系紧密。现代工业、农业、交通、商贸、市政等各个部门、人民物质文化生活都离不开电能。供电不充足和故障中断往往会给国民经济造成巨大损失,给人民生活带来很大影响。例如,震惊世界的2003年“8.14美加大停电”事故使美国中西部到东北部的8个州和加拿大安大略省的电力中断,5000万人无电可用,给美国造成100~350亿美元的经济损失,加拿大2003年8月份国内生产总值也因停电下降了0.7%。而2012年7月30日和31日印度北部和东部地区连续发生两次大面积停电事故,覆盖了印度国土的一半以上,导致交通系统陷入混乱,全国超过300列火车停运,首都新德里的地铁也全部停运,造成旅客大量滞留,公路交通出现大面积拥堵,大批矿工被困井下,银行系统陷入瘫痪,直接影响6亿多人的生活。世界各国普遍都将电力系统放在国民经济中优先发展的地位,以确保国民经济正常、健康地发展和社会的稳定。

(2) 系统结构庞大复杂。现代电力系统规模庞大,总装机容量达到数千万至上亿千瓦,覆盖地区达到数百万平方公里,电压等级达到数百至上千千伏。有人说,电力系统是现代社会的最大最复杂的工业生产系统,这一说法并不过分。就中国大陆而言,电力工业经过多年的发展建设,截至2013年底,全国发电装机容量已突破12亿kW,达到12.57亿kW,超过美国,跃居世界第一位。形成了若干个以500kV电压等级为主干网、装机容量达数千万千瓦的跨省大地区电力系统,已经建成和正在建设长治—荆门、浙北—福州等若干条交流1000kV特高压输电线路,向家坝—上海、锦屏—苏南等若干条直流±800kV特高压输电工程,实现跨大地区电力系统间的互联,全国规模的电力联网已初步形成。

(3) 各种暂态过程非常短促。当电力系统受到扰动后,由一种运行状态过渡到另一种运行状态的时间非常短暂。一般而言,电力系统机电暂态过程时间以秒计或不足秒计,电磁暂态过程更仅仅以毫秒乃至以微秒计。

(4) 电能不能大量储存。电能的生产、输送、分配及消费几乎是同时进行的,在任一时刻,发电机发出的电能等于负荷消费的电能(在发电机容量允许范围内)。近年来出现的抽水蓄能电厂能够储能,但本质上是将电能转化为水力能储存的,并且规模不可能很大。其他,诸如飞轮储能、超导储能、超级电容储能亦是如此。

2. 电力系统基本要求

由于电力系统具有上述特点,因此,对电力系统运行提出如下基本要求:

(1) 保证供电的可靠性。对用户供电的中断将会使生产停止,会使人民的生活秩序、生活质量受到影响,甚至会危及人身、设备的安全,造成严重后果。因此,保证供电的可靠性一直都是电力系统运行的最基本要求。但是在某些特殊情况下,当电力系统无法满足全部负荷的需要时,应有选择性地保证重要用户的供电。

根据负荷允许停电程度的不同,将负荷分为三级:

一级负荷:若停电将造成人身伤亡和设备事故,产生废品,使生产秩序长期不能恢复或产生严重政治影响,使人民生活发生混乱等。对于一级负荷,要保证不间断供电。

二级负荷:停电将造成大量减产,使人民生活受到影响。

三级负荷:不属于一、二级的负荷,如工厂的附属车间、小城镇等。

对二、三级负荷,在电能不足时,应优先保证二级负荷的供电。

从电力系统角度来看,目前保证可靠供电的措施主要有:提高系统运行的稳定性及可靠性指标,建设坚强的电网架构,采取强有力的运行监视和控制技术措施,应用微机保护等。

(2) 保证良好的电能质量。电压和频率是衡量电能质量的两个主要指标,我国规定,用户供电电压的允许偏移量是额定值的 $-7\% \sim +5\%$;额定频率是 50Hz ,允许的偏移量为 $-0.2 \sim +0.2\text{Hz}$ 。近年来,由于电力电子装置的大量应用,交流电的波形也为人们所关注,成为电能质量的指标之一。

电压和频率偏离额定值过大或波动较大、交流电的波形畸变(谐波含量大)都会对电力用户和电力系统自身造成不良影响,甚至危害电力系统运行和电力用户。

(3) 保证系统运行的经济性。电能用途广、耗量大,因此生产电能耗费的一次能源占国民经济能源总耗费的比重大。电力系统在保证安全、优质供电的前提下,通过将单一电力系统联合组成联合电力系统,合理安排各类发电厂所承担的负荷,降低机组发电量单位能源消耗,组织电力系统经济运行,对无功功率进行就地补偿,进行负荷侧优化管理等措施,这样可以有效地降低电力生产和运行成本,获得最大的经济效益。

三、电力系统自动化主要内容

自动化是指用特定的仪器、设备对生产过程、工作流程等进行调节和控制,以代替人工直接操作控制。自动化可以有效地提高生产过程、工作流程的效率和改善生产工作人员的劳动条件,在许多情况下可以完成人力难以直接胜任的工作。典型的自动化控制系统应该包括控制对象、自动控制装置以及它们之间的监测和控制信息通道,如图1-2所示。

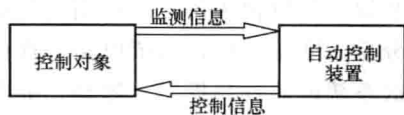


图 1-2 自动化系统逻辑框图

电力系统自动化是保证电力系统安全、优质、经济运行的综合性技术,是自动控制技术、信息技术在电力系统中的应用。为适应电力系统的特点和满足其基本要求,对电力系统自动化提出了很高的要求,即在电力系统中,应用各种具有自动检测、信息处理和传输、自动操作和控制功能的装置对电力系统设备、子系统或全系统进行就地或远方的自动监测、调节和控制,从而保证电力系统正常运行,安全、经济、稳定地向所有用户提供质量良好的电能;在电力系统发生偶然事故时,迅速切除故障防止事故扩大,尽快恢复系统正常运行,保证供电可靠性。电力系统自动化是随着电力系统的发展而逐步发展进步的。现代电力系统自动化是信息技术、计算机技术及自动控制技术在电力系统中的应用,针对电力系发电、输电、变电、配电、用电等五个有机联系的环节分别有相对应的自动化系统和自动装置进行监视和控制。结合电力系统运行的特点,按照其他复杂系统控制的一般规律,电力系统自动化也是分层实现的。在现阶段,电力系统自动化的主要内容大致可以划分为以下几方面:

1. 电力系统调度自动化

电力系统中的各发电厂、变电站及输电线路将反映电力系统运行状态的实时信息经由装设在各厂站的远动装置传送至调度控制中心,由调度控制中心计算机系统和运行人员对电力系统当前运行状态进行计算分析,根据计算分析结果判断系统状态、做出调节控制决策命令,通过远动信息通道传送至各个发电厂和变电站,从而实现对电力系统运行的自动化调度控制。调度控制的目的是保证系统优质、安全、经济地向用户供电。电力系统调度自动化可

概述为遥测、遥信、遥控、遥调、遥视“五遥”功能，即称为 SCADA 系统。

2. 发电厂动力机械自动控制

对各类发电厂的动力机械运行实现自动控制是现代电力系统的必然要求。电厂的动力机械随发电厂的类型不同而大不相同，其控制要求和控制规律也很不相同。火力发电厂的动力机械主要是为锅炉汽轮机等热力设备的热工过程服务的，其自动控制系统主要包括锅炉自动控制系统、汽轮机自动控制系统、机炉协调主控系统、辅助设备自动控制系统、计算机监视系统等。水电厂需要控制的主要是水轮机、调速器、闸门启闭及水轮发电机励磁等。

大型火电厂的监视和控制系统经过了对动力机械自动控制模拟控制、功能设备分散方式的数字控制、分层分散方式的数字控制三个阶段，其特征是各发电机组所用的计算机系统彼此孤立，目前已发展到采用分层开放式工业自动化系统构成火电厂综合自动化系统。水电厂自动化的控制对象分散，包括水轮发电机组、开关站、公用设备、闸门及船闸等。按控制对象为单元设置多套相应的装置，构成水电厂现场控制单元，完成控制对象的数据采集和处理、机组等主要设备的控制和调节及装置的数据通信等。水电厂采用分布式处理，一般与电厂分层控制相结合，形成水电厂分层、分布式控制系统。

3. 变电站综合自动化

变电站综合自动化是在原来变电站常规二次系统基础上发展起来的。常规变电站将大量现场一次设备，如变压器、开关、母线、电压互感器（TV）、电流互感器（TA）等，同安装在控制室内的单项自动化装置（如继电保护、重合闸、故障录波和测距、各种变送器、远动装置、测量仪表等）之间用大量电缆一一对应地连接起来。其设备复杂，占地面积大，功能分立。随着大规模集成电路、现代信号处理技术和计算机监控技术的发展，将原来变电站二次系统的监视与控制、远动、继电保护、故障记录等功能进行功能的综合和优化设计，形成两级单元，即间隔级单元和中央单元，完全取消了传统的集中控制屏，二次回路极为简洁，控制电缆大量减少，构成一个统一的计算机系统来完成变电站综合自动化功能，包括变电站远方监视与控制、电压无功控制、远动和继电保护、测量和运行参数自动打印、故障信息处理及“五防”操作闭锁等，可以实现无人值班运行，具有功能综合化、结构微机化、操作监视屏幕化的特征。

4. 电力系统自动装置

电力系统自动装置可以分为正常运行自动装置、异常状态下的安全控制装置及继电保护装置三类，也可分为自动调节装置和自动操作装置两类。自动调节装置主要有同步发电机自动励磁控制、电力系统自动调频、电压无功自动控制装置等；自动操作装置主要有同步发电机自动并列装置、自动解列装置、电力系统继电保护装置、自动低频减载装置、自动重合闸、水轮发电机低频自启动、事故切机、备用电源自动投入装置等。电力系统自动装置对保证电力系统的安全稳定运行、保证电能质量以及防反事故都具有重要的作用。随着自动控制理论、电子元器件、计算机技术和通信技术的不断发展，电力系统自动装置已经由传统的就地控制、单一功能型向就地与网络协调控制、多功能综合型发展，技术不断更新，性能更加优化完善。

四、电力系统自动化的发展

电力系统自动化是一个发展着的概念，其涵盖内容在深度和广度上不断拓延、更新和相互融合，电力系统发展对其自动化的要求也不断提高。电力系统自动化正在发展成为一个

CCCPE 的统一体,即计算机 (Computer)、控制 (Control)、通信 (Communication) 和电力电子 (Power Electronics) 装置构成的电力自动化系统。下面介绍已经出现或正在发展的电力系统自动化新技术。

1. 灵活交流输电系统

灵活交流输电系统 (Flexible Alternative Current Transmission System, FACTS) 是近年来发展迅速的一项电力系统自动化新技术,受到世界各国电力系统和电气设备厂家的高度重视。FACTS 是在输电系统的重要部位采用具有单独或综合能力的大功率电力电子装置,应用先进的控制策略,对输电系统的主要参数 (如电压、相位差、电抗等) 进行调整和控制,在现有电力一次系统设备不做大变化的条件下,充分发挥现有电网的潜力,有效地提高输电的可靠性、可控性、输电能力和电能质量。属于 FACTS 的装置有新型静止无功发生器 (Statcom)、静止无功补偿器 (SVC)、可控串联补偿器 (TCSC)、综合潮流控制器 (UPFC)、可控移相器 (TCPR)、固态断路器 (SSCB)、新能源发电并网装置等。这些新型的电力电子装置的研究方兴未艾,有的已经实用化运行,有的已通过工业试验,更多的仍在研究探讨之中,可以预见 FACTS 技术在不久的将来将得到长足发展,成为电力系统技术进步的一大亮点。

2. 电网调度 SCADA-EMS 智能综合

电网调度自动化系统的规模、层次、功能在不断发展,在传统的数据采集和监控功能 (SCADA) 基础之上又引入了智能控制技术 (IC)、数字信号处理技术 (DSP)、全球卫星定位系统 (GPS) 技术等,逐步发展和丰富了自动发电控制 (AGC) 功能、经济调度控制 (EMC) 功能、系统状态估计 (SE) 功能、调度员在线潮流 (DFF) 分析、安全分析 (SA) 功能、调度员模拟培训 (DTS) 功能等,称之为电网高级应用软件 (PAS)。PAS 投运后,电网运行方式的改变以及当前运行方式下遇到大扰动时的后果就可以通过 PAS 自动预计出来。网络数据库的建立,为各种电力系统的优化软件,如线损修正、无功优化、最优潮流等的开发提供了条件。自从将 PAS 综合到电网调度自动化系统,形成了 SCADA/AGC—EDC/PAS 系统后,一般就认为电网调度自动化系统已经从 SCADA 系统升级为电力系统的能量管理系统 EMS (Energy Management System),EMS 被认为是现代电力系统发展的最显著成就之一。

EMS 是以计算机和现代网络技术为基础的现代电力调度自动化系统,主要针对发电和输电,用于大区级电网和省级电网。EMS 由计算机、操作系统、支持系统、数据收集、能量管理、电力网络分析、调度员培训模拟系统七个部分组成。

3. 电网广域监测系统

电网广域监测系统 (Wide Area Measurement System, WAMS) 采用同步相角测量技术,是新一代 EMS 的子系统功能之一。WAMS 通过逐步布局全网关键测点的同步相角测量单元 (Phase Measurement Unit, PMU),实现对全网功率、相位、同步相角及电网主要数据的实时高速率采集。采集数据通过电力调度数据网络实时传送到广域监测主站系统,并通过全球定位系统 GPS 精确对时,能够保证全网数据的同步性,从而提供对电网正常运行与事故扰动情况下的实时监测与分析计算,并及时获得和掌握电网运行的动态过程。

4. 智能配电网自动化

配电网自动化又称配电自动化,是电力系统自动化的必然趋势。它利用计算机、电子和

通信技术对配电网和用户的设备及用电负荷进行远方自动监视、控制和管理。其分为配电调度自动化、配电变电站自动化、配电线路自动化和用户自动化等。其主要功能有：配电网数据采集及运行控制、优化配电网运行、负荷管理、电压/无功综合控制、配电网可靠性管理、信息管理、配电网地理图示、安全与节能管理。近年来配电网自动化发展迅速，建立在支持含并网分布式电源（光伏发电、微型燃气轮机、热电冷联产发电、小型水力发电、风力发电、燃料电池、超级电容等）和满足电动汽车充放电、定制电力、用户参与权要求的智能配电网，深化了配电自动化的内涵，提升了配电自动化的功能要求，并因此形成了微电网及其控制的概念和智能配电网自动化的概念。

5. 智能（数字化）变电站

变电站综合自动化结构、功能的发展正在走向智能化。智能变电站（Smart Substation）是采用先进、可靠、集成、低碳、环保的智能设备，遵循国际统一的标准 IEC 61850，以全站信息数字化、通信平台网络化、信息共享标准化为基本要求，自动完成全站信息采集、测量、控制、保护、计量和监测等基本功能，并可根据需要支持全电网实时自动控制、智能调节、在线分析决策、协同互动等高级功能的变电站。智能（数字化）变电站技术正处在发展和建设阶段中。



思考题

1. 现代电力系统有哪些主要特点？
2. 对电力系统运行应有哪些基本要求？
3. 试简述电力系统自动化概念及其主要内容。
4. 智能（数字化）变电站与传统的变电站综合自动化概念有哪些不同？
5. 怎样理解“电力系统自动化是一个发展着的概念”？您了解电力系统自动化发展的相关动态和内容吗？



第二章 同步发电机自动并列

正常情况下电力系统中运行着的所有同步发电机转子都以相同的电角速度旋转，转子间的电角度保持相对稳定，称为发电机的同步运行。由于电力系统运行的需要，电力系统中运行着的发电机的台数是变动的，即经常有同步发电机退出或重新投入电网运行，将同步发电机投入电网并列运行的操作称为并列操作。

第一节 电力系统并列概述

一、并列的基本要求与操作

(一) 并列的基本要求

电力系统中，并列分为发电机并列和系统并列两种。发电机并列是将发电机与系统连接的断路器闭合，使发电机投入电力系统运行的操作。系统并列是将两个原本不相联的系统的联络线上的断路器闭合，使两系统并联在一起运行的操作。两种并列的原理大同小异，对并列的基本要求是：

- (1) 并列时冲击电流应尽可能小，瞬时最大值不超过待并发电机额定电流的 1~2 倍。
- (2) 并列后应能迅速进入同步运行状态。

所谓冲击电流是指并列断路器合闸时通过断路器主触头的电流。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损坏，如造成定子绕组端部松脱、开断等，还可能造成电力系统中其他设备损坏或电力系统振荡。这里所谓“进入同步运行”是指刚并入电力系统的发电机组与系统内的发电机组以相同的电角速度旋转，或两个刚并列的系统内的发电机组以相同的电角速度旋转。

并不是每一次并列都是成功的。如果并列时冲击电流超过允许值或不能被拉入同步，就会对机组的安全造成危害。当机组容量与系统容量相比足够大时还会对系统产生大的扰动，造成系统振荡。出现上述情况时，必须立即将刚刚并列的两部分解列。

(二) 并列操作

实现同步发电机并列的操作，有准同期并列操作（也称准同步并列操作）和自同期并列操作（也称自同步并列操作）两种方式。

(1) 准同期并列，是在同步发电机已投入调速器和励磁装置，当发电机电压的幅值、频率和相位分别与并列点系统侧电压的幅值、频率和相位接近相等时，通过并列点断路器合闸将发电机并入系统。其优点是并列时的冲击电流小，对发电机和系统不会带来明显的冲击。缺点是在并列操作过程中需要对发电机电压和频率进行调整，捕捉合适的合闸相位点，所需并列时间较长。这种操作可以由自动准同期装置来完成，某些情况下也可由有经验的运行人员手动来完成。

(2) 自同期并列，是将未加励磁电流但接近同步转速且机组加速度小于允许值的发电

机,通过断路器合闸并入系统,随之投入发电机励磁,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。这种并列方式具有操作简单和并列时间短的优点,但在并列时产生较大的冲击电流,同时会从系统吸收无功而造成系统的电压下降。

随着自动控制技术的进步,现在一般都采用自动准同期并列方法将发电机组投入运行。由于并列操作不当可能造成设备损坏或系统振荡,所以并列操作是电力系统自动化中最重要的操作之一,只有经验丰富的运行人员才被允许进行手动并列操作。

二、准同期并列

准同期并列时先将待并列双方(系统或发电机)的电压加到并列断路器主触头两侧,然后调整两侧电压,在电压幅值、频率和相角分别相等时闭合断路器主触头,使并列双方并联在一起运行。

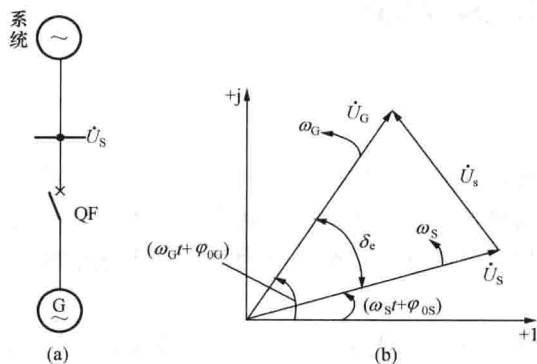


图 2-1 发电机同期并列示意图

(a) 电路图; (b) 相量图

(一) 准同期并列的理想条件

图 2-1 (a) 是发电机同期并列电路图。设并列前发电机电压的瞬时值为

$$u_G = U_G \sin(\omega_G t + \varphi_{0G}) \quad (2-1)$$

式中: U_G 为发电机电压的幅值; ω_G 为发电机电压的角频率; φ_{0G} 为发电机电压的初相角。

系统电压的瞬时值

$$u_s = U_s \sin(\omega_s t + \varphi_{0s}) \quad (2-2)$$

式中: U_s 为系统电压的幅值; ω_s 为系统电压的角频率; φ_{0s} 为系统电压的初相角。

发电机电压和系统电压的相量图见图 2-1 (b)。图中 $\dot{U}_G$ 、 $\dot{U}_s$ 和 $\dot{U}_e$ 分别为发电机电压、系统电压和断路器 QF 主触头两侧电压之差的相量。由此可以得出: 如果调节断路器两侧电压, 使其幅值相等 (即 $U_G = U_s$)、频率相同 (即 $\omega_G = \omega_s$)、相角一致 (即 $\Delta\delta = \delta_G - \delta_s = 0$) 时, 断路器两端的电压差 $\Delta \dot{U}$ 就会等于零。显然, 在这种情况下闭合断路器主触头时冲击电流为零, 且并列之后双方会立即同步运行。这无疑是同期并列的理想条件。

(二) 准同期并列误差对并列的影响

实际上, 准同期并列合闸时很难完全满足理想条件, 而会存在一定误差。可以从原理上分析, 当分别存在电压幅值差、频率差和相角差时对并列产生的影响。

1. 合闸电压幅值差对并列的影响

分析条件是 $U_G \neq U_s$, $\omega_G = \omega_s$, $\delta_e = \delta_G - \delta_s = 0$ 。

当 $U_G > U_s$ 时, 此时的相量关系如图 2-2 (a) 所示。在这种情况下并列时产生的冲击电流的有效值

$$I''_{im} = \frac{|U_G - U_s|}{X''_d + X_s} = \frac{\Delta U}{X''_d + X_s} \quad (2-3)$$

式中: X''_d 为发电机直轴次暂态电抗; X_s 为电力系统等值电抗。

在忽略待并列发电机定子电阻和系统等值电阻的情况下, 冲击电流 $\dot{I}''_{im}$ 滞后电压差

$\dot{U}_s 90^\circ$, 如图 2-2 (a) 所示。由图可知, 冲击电流 $\dot{I}_{im}''$ 也滞后发电机电压 $\dot{U}_G 90^\circ$ 。所以, 在只存在电压差的情况下并列机组会产生无功冲击电流。冲击电流的最大瞬时值

$$i_{imM}'' = 1.8 \times \sqrt{2} I_{im}'' \quad (2-4)$$

冲击电流 I_{im}'' 与电压差 U_s 成正比, 滞后同步发电机电压 90° , 为无功性质, 发电机并入系统时立即向系统输出无功功率。当 $U_G < U_s$ 时, 冲击电流超前同步发电机电压 90° , 发电机从系统吸收无功功率。冲击电流产生的电动力对发电机定子绕组特别在其端部可能造成危害。因此, 应控制在并列时发电机与系统电压的差值, 保证不致因冲击电流过大产生的电动力损坏发电机和对系统带来大的无功冲击。

2. 合闸相角差对并列的影响

分析条件是 $U_G = U_s$, $\omega_G = \omega_s$, $\delta_e = \delta_G - \delta_s \neq 0$ 。此时的相量关系如图 2-2 (b) 所示。这种情况下并列发电机产生的冲击电流有效值 I_{im}''

$$I_{im}'' = \frac{\Delta U}{X_q'' + X_s} \quad (2-5)$$

$$\Delta U = 2U_G \sin \frac{\delta_e}{2} \quad (2-6)$$

考虑到并列前发电机空载运行, 定子电压和电动势相等, 并列时冲击电流有效值计算式为

$$I_{im}'' = \frac{2U_G}{X_q'' + X_s} \sin \frac{\delta_e}{2} = \frac{2E_q''}{X_q'' + X_s} \sin \frac{\delta_e}{2} \quad (2-7)$$

式中: X_q'' 为发电机交轴次暂态电抗; E_q'' 为发电机交轴次暂态电动势。

最大冲击电流也为

$$i_{imM}'' = 1.8 \times \sqrt{2} I_{im}''$$

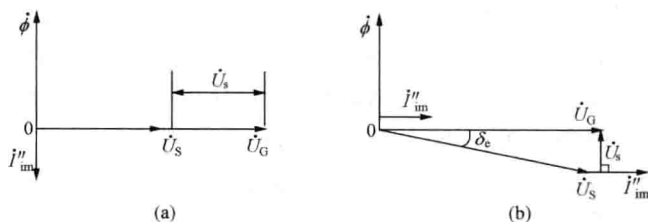


图 2-2 准同期并列条件分析相量图

(a) 幅值差的影响; (b) 相角差的影响

当合闸相角差 δ_e 不大时, 冲击电流主要为有功性质, 随 δ_e 增大, 冲击电流无功性增强。由于并列时一般 δ_e 都很小, 所以在只有相角差的情况下并列, 发电机主要承受有功的冲击, 这使机组受到轴扭矩冲击, 在发电机电压相量超前或者滞后系统电压时发电机主轴受到制动或者是驱动的轴力矩冲击。因此, 要限制并列合闸时的相角差在一定范围内。

3. 合闸频率差对并列的影响

分析条件是 $U_G = U_s$, $\delta_e = 0$, $\omega_G \neq \omega_s$ 。发电机与系统并列之前, 电动势 $\dot{E}_q$ 和机端电压是相同的。在并列之后, 发电机电压 $\dot{U}_G$ 与系统电压 $\dot{U}_s$ 为同一电压 (即 $\Delta U = 0$), 使并列之前 $\dot{U}_G$ 与 $\dot{U}_s$ 的相角差 δ_e 成为 $\dot{E}_q$ 与 $\dot{U}_s$ 之间的夹角, 即功率角 δ 。因此, 可以利用同步发电机的功角特性进行分析。为了使分析简化且突出主要问题, 设系统为无穷大。这样机组并入系

统后不会牵动系统频率发生变化,在机组被拉入同步的过程中机组调速器也不动作,输入原动机的功率不变。

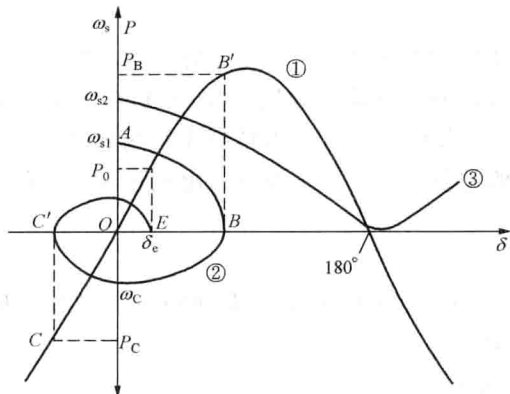


图 2-3 机组并列时同步过程分析图

设机组转子角速度 $\omega_G > \omega_s$ 。并列合闸的瞬时, $\delta_e = \Delta\delta = 0$, 在图 2-3 中 A 点。由于 $\omega_s = \omega_G - \omega_s > 0$, 并列之后, 发电机随即向系统输出有功功率, 沿功角特性曲线①从 0 点向 B' 点移动。发电机组受到制动而减速, 功率角 δ 增大, ω_s 与 δ 沿曲线②从 A 点向 B 点变化。设这期间机组原动机功率不变, 未提供发电功率, 发电机输出功率由机组动能的减少来提供, 因此 ω_G 不断减少。当发电机功角特性移动到 B 点时 $\omega_G = \omega_s$, 这时发电机仍然输出功率, ω_G 继续减小, ω_s 开始变负,

功率角 δ 开始减小, 发电机功角特性从 B' 点向原点移动, 到达原点时, ω_s 为最大负值且 $\delta = 0$ 。机组输出功率曲线开始进入负值区, 功率角 δ 变负, 这时机组就变成电动机运行, 从系统汲取的有功功率将使机组加速, 沿曲线移动直到 $\omega_G = \omega_s$ 的 C 点, 功率角 δ 为负的最大值。此后, $\omega_G > \omega_s$, 功率角 δ 又往反方向运行。由于系统和机组的阻尼等功率损耗因数, 机组运行来回摆动的摆幅会逐渐减小, 直到机组进入同步运行为止。由此进一步分析可见, 机组进入同步运行的暂态过程与并列时滑差角频率 ω_s 的大小有关, ω_s 较小时, 可以很快进入同步运行。若 ω_s 很大, 且正使机组加速的机组原动力 P_0 也较大时, 将使机组经历较长时间的振荡之后才能进入同步运行, 甚至有可能使功率角 $\delta \geq 180^\circ$, 发电机将沿图 2-3 中曲线③运行而失步, 最终由保护装置将机组解列。因此, 准同期并列时应该限制频率差不超过允许值。

理解了上述分析, 读者应该能分析当机组转子角速度 $\omega_G < \omega_s$ 情形下并列合闸过程了。发电厂实际准同期操作时应该在 ω_G 略大于 ω_s 时合闸更有利。

在实际的准同期并列过程中, 三个并列条件的偏差往往是同时存在的, 对发电机和系统的影响是这几种情况的综合。

【例 2-1】 当系统电压 $U_s = 10$, 待并发电机电压为 $5\sqrt{3}\text{kV}$, 并列合闸初相角为 $\frac{\pi}{6}$ 时, 请通过画相量图分析推出合闸冲击电流有效值 I''_m , 说明其 (有功、无功) 性质及对发电机的影响, 并计算出冲击电流最大瞬时值 i''_{mM} (已知 $X''_d = 0.2\Omega$, $X''_q = 0.25\Omega$, $X_\Sigma = 0.15\Omega$)。

解 画相量图如图 2-4 所示。

$$\text{电压差 } U_s = U_s \sin \frac{\pi}{6} = 10 \sin \frac{\pi}{6} = 5(\text{kV})$$

$\dot{U}_s$ 垂直于 $\dot{U}_G$, 则合闸冲击电流 $\dot{I}''_m$ 与 $\dot{U}_G$ 平行, $\dot{I}''_m$ 为有功电流, 发电机并列后立即与系统交换有功功率, 这会使机组联轴受到冲击扭矩危害。因为 $\dot{I}''_m$ 与 $\dot{U}_G$ 平行, 且沿 q 轴方向, 所以在 I''_m 计算中发电机次暂态电抗应取 X''_q 而不是 X''_d , 则

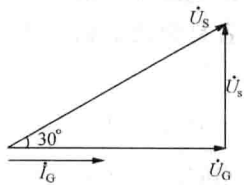


图 2-4 例 2-1 解图

$$I''_{im} = \frac{U_s}{X''_q + X_s} = \frac{5}{0.25 + 0.15} = 12.5(\text{kA})$$

$$i''_{imM} = 1.8 \times \sqrt{2} I''_{im} = 1.8 \times \sqrt{2} \times 12.5 = 31.82(\text{kA})$$

三、自同期并列

自同期并列可以结合图 2-5 说明。开机前将发电机断路器 QF 和灭磁开关 K 断开, K 的动断辅助触点 K' 闭合将发电机转子绕组通过自同期电阻 R_z 短路。开启机组, 将机组驱动到接近额定转速(转速差一般控制在额定转速的 5% 以内)时自动闭合发电机断路器 QF, 由 QF 的辅助触点联动将 K 闭合、K' 断开, 给发电机转子绕组加励磁电流。这样, 发电机组将在电动势增加、冲击电流减小的过程中被系统拉入同步。

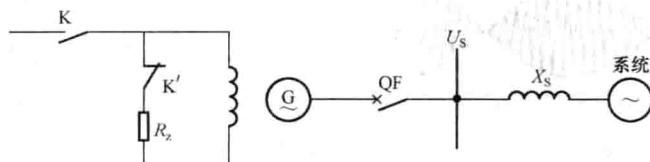


图 2-5 自同期并列简图

自同期并列的优点是操作简单, 并列迅速, 易于实现自动化。

由于自同期并列合闸时发电机尚无励磁, 所以在断路器闭合的瞬间相当于电力系统通过发电机定子绕组金属性三相短路, 冲击电流的周期分量计算式为

$$I''_{im} = \frac{U_s}{X''_d + X_s} \quad (2-8)$$

式中: U_s 为系统电压; X_s 为系统等值电抗; X''_d 为发电机纵轴次暂态电抗。

自同期时发电机端电压为

$$U_G = \frac{U_s}{X''_d + X_s} X''_d \quad (2-9)$$

上两式表明, 同步发电机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点和缺点, 它更适合在电力系统事故时作为事故备用的水轮发电机组低压自启动后, 以自同期方式将机组快速并入电网。自同期并列不能用于两个系统之间的并列, 也不用于汽轮发电机组。现代电力系统多采用大容量机组, 而大容量机组自同期并列对系统扰动大; 同时, 自同期并列也容易造成机组损坏。现在我国大型水轮发电机组已不采用自同期方式并列, 中小型水电机组也比较少用了。

第二节 准同期并列检测基本原理

发电机并列之前, 并列断路器两侧间的电压差 u_s 为脉动电压波, 脉动电压波的表述为

$$u_s = U_G \sin(\omega_G t + \delta_G) - U_s \sin(\omega_s t + \delta_s) \quad (2-10)$$

不失一般性可设初相角 $\delta_G = \delta_s = 0$, 则当 $U_G = U_s$ 时

$$u_s = 2U_G \sin\left(\frac{\omega_G - \omega_s}{2}t\right) \cos\left(\frac{\omega_G + \omega_s}{2}t\right) = U_s \cos\left(\frac{\omega_G + \omega_s}{2}t\right) \quad (2-11)$$