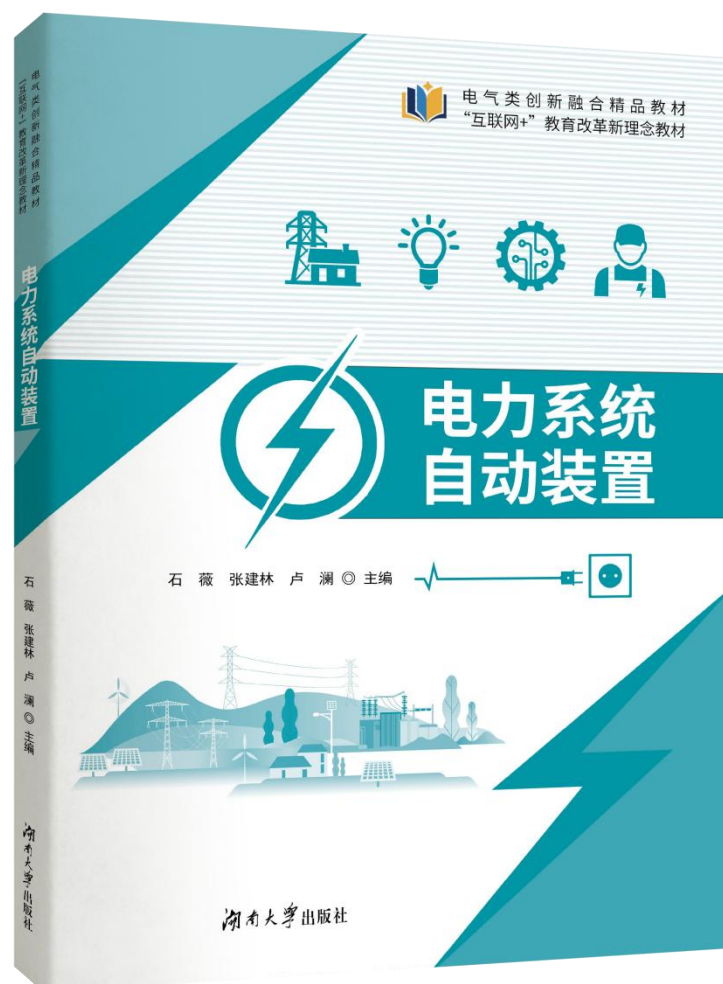


电力系统自动装置



类目：电气类

书名：电力系统自动装置

主编：石薇 张建林 卢澜

出版社：湖南大学出版社

开本：大16开

书号：978-7-5667-4114-1

使用层次：通用

出版时间：2025年7月

定价：49.80元

印刷方式：双色

是否有资源：有



电气类创新融合精品教材
“互联网+”教育改革新理念教材



电力系统自动装置

主编 ◎ 石 薇 张建林 卢 渊



主编 ◎ 石 薇 张建林 卢 渊

湖南大学出版社

湖南大学出版社



电力系统自动装置

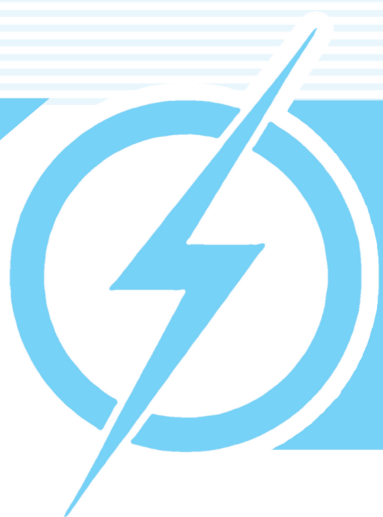
责任编辑：周紫燕
封面设计：旗语书装



定价：49.80元



电气类创新融合精品教材
“互联网+”教育改革创新理念教材



电力系统 自动装置

主 编 ◎ 石 薇 张建林 卢 澜

副主编 ◎ 王新建 王启震 谢 权

杨洪磊 王 春 徐 瑶

胡玉霞 方晓彤 高华鑫

马子品



湖南大学出版社

· 长 沙 ·

图书在版编目(CIP)数据

电力系统自动装置 / 石薇, 张建林, 卢澜主编.

长沙: 湖南大学出版社, 2025. 7. -- ISBN 978-7-5667-

4114-1

I. TM76

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2025SD3522 号

电力系统自动装置

DIANLI XITONG ZIDONG ZHUANGZHI

主 编: 石 薇 张建林 卢 澜

责任编辑: 周紫燕

印 装: 唐山唐文印刷有限公司

开 本: 889 mm×1194 mm 1/16 印 张: 14.5 字 数: 353 千字

版 次: 2025 年 7 月第 1 版 印 次: 2025 年 7 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5667-4114-1

定 价: 49.80 元

出 版 人: 李文邦

出版发行: 湖南大学出版社

社 址: 湖南·长沙·岳麓山 邮 编: 410082

电 话: 0731-88822559(营销部), 88821174(编辑室), 88821006(出版部)

传 真: 0731-88822264(总编室)

网 址: <http://press.hnu.edu.cn>

电子邮箱: xiaoshulianwenhua@163.com

版权所有, 盗版必究

图书凡有印装差错, 请与营销部联系



前言 / Preface

在现代社会中,电力已经成为支撑国民经济发展和保障人民日常生活的关键能源。电力系统的安全、稳定、高效运行,不仅关系到各行各业的正常生产经营,更与社会的和谐稳定息息相关。电力系统自动装置作为确保电力系统可靠运行的核心技术手段,在维持电力系统的稳定、优化电能质量、提高运行效率等方面发挥着至关重要的作用。

本书《电力系统自动装置》旨在全面、系统地介绍电力系统中各类自动装置的基本原理、结构组成、运行特性以及设计方法。通过深入学习这些自动装置的相关知识,读者能够更好地理解电力系统的运行机制,掌握保障电力系统安全稳定运行的技术手段。

本书内容编排合理,结构清晰。注重理论与实践相结合,在介绍基本原理的同时,引入了大量的实际案例和工程应用,有助于读者加深对知识的理解和掌握。每章还配备了相应的思考题,方便读者巩固所学知识,培养分析问题和解决问题的能力。

本书可作为院校电气工程及其自动化专业的教材,也可供从事电力系统规划、设计、运行、维护等工作的工程技术人员参考。

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,在此表示衷心的感谢。由于编者水平有限,书中难免存在疏漏之处,敬请广大读者批评指正。

编 者



目录 Contents

第一章 自动装置及其数据的采集与处理 1

第一节	自动装置的组成.....	1
第二节	采样、量化与编码技术	7
第三节	交流采样的电量计算和前置算法	11
思考题		16

第二章 同步发电机的自动并列 17

第一节	概 述	17
第二节	准同期并列的基本原理	20
第三节	频率差的测量及调整	28
第四节	电压差的测量及调整	33
第五节	自动准同期并列装置的合闸控制	37
第六节	微机型自动并列装置	39
思考题		43

第三章 同步发电机励磁自动控制系统 44

第一节	概 述	44
第二节	同步发电机励磁系统	53
第三节	励磁系统中的整流电路	60
第四节	励磁控制系统调节特性和并联机组间的无功分配	71
第五节	励磁调节装置的原理	81
第六节	数字式励磁调节器的原理	83
思考题		108

**第四章 励磁自动控制系统的动态特性** 109

第一节 概 述	109
第二节 励磁控制系统的传递函数	110
第三节 励磁自动控制系统的稳定性	119
第四节 励磁自动控制系统对电力系统稳定的影响	125
思考题	143

第五章 电力系统频率及有功功率的自动调节 144

第一节 电力系统的频率特性	144
第二节 调速器的基本原理及特性	156
第三节 电力系统的自动调频	162
第四节 自动发电控制技术	169
思考题	173

第六章 自动重合闸 174

第一节 概 述	174
第二节 输电线路的三相一次自动重合闸	176
第三节 高压输电线路的单相自动重合闸	185
第四节 高压输电线路的综合重合闸	189
思考题	190

第七章 电力系统自动低频减载装置 192

第一节 概 述	192
第二节 自动低频减载装置的工作原理	196
第三节 微机频率电压紧急控制装置	200
思考题	207

第八章 电力系统其他安全自动装置 208

第一节 备用电源自动投入装置	208
第二节 厂用电切换装置	214
第三节 自动解列装置	217
第四节 故障录波装置	219
思考题	223

参考文献 224

第一章

自动装置及其数据的采集与处理

第一节 自动装置的组成

随着计算机技术的飞速发展，以计算机系统为核心的电力系统自动装置已非常成熟并广为应用。由于电力系统运行中主要的电气参数是连续的模拟量，而计算机内部参与工作运行的信号是离散的二进制数字信号，因此与电力系统运行有关的自动装置一般都需要采集连续的模拟信号，并将其转换成离散的数字信号后进入计算机进行处理，即数据采集和模拟信号的采集与数字化转换。

一、硬件组成形式

从硬件组成来看，目前电力系统自动装置的结构形式主要有四种：基于通用计算机架构的工业控制计算机系统、基于专用数字处理器的控制系统、集散控制系统(distributed control system, DCS)、基于计算机网络系统的广域控制系统。

在电力系统中，控制功能单一的自动装置所需采集的信息较少，控制要求相对单一，软件处理工作也较简单，因此基于专用数字处理器的控制系统就可满足应用要求，如继电保护、同步发电机自动并列装置等。但对于控制功能要求较高、软件运行任务较为繁重的系统，如发电机励磁自动控制系统，大多采用基于通用计算机架构的工业控制计算机系统。对于分散的多对象的成套监测控制则可采用集散控制系统，如发电厂变电站的部分监测控制和远动装置及热电厂机炉集控系统。而电网调度控制中的自动化和电力系统的调频工作则是通过基于计算机网络系统的广域控制系统，并借助电力系统专用通信调度网来完成。

(一) 基于通用计算机架构的工业控制计算机系统

通用计算机架构是采用标准化的总线系统将中央处理单元、控制单元、存储单元和输入输出单元连接起来构成的信息处理平台。工业控制计算机系统在通用计算机架构的基础上，具有更符合工业标准的硬件系统和特殊的工业标准总线，可以在各种极端条件下运行。工业



控制计算机还具有冗余能力，可以完成测量、控制、通信和管理等任务，在电力系统许多重要的自动化装置中得到了广泛的应用。工业控制计算机体系结构具有很强的交互性和互操作性，是一个开放的标准化平台。

基于通用计算机架构的工业控制计算机系统一般由中央处理器(CPU)、存储器(memory)、芯片组(chipset)、总线、输入输出端口、图形显示单元以及相关电路构成。这些组件与A/D和D/A转换器、开关量输入输出(I/O)和通信单元等部分组成的外围单元共同完成信号的采集、变换、控制。基于通用计算机架构的工业控制计算机系统如图 1-1 所示。

1. 中央处理器

中央处理器是计算机系统的核心单元，担负了计算机系统的控制和管理等任务，对采集到的数据做必要处理，然后根据要求做出判断和发出指令等。

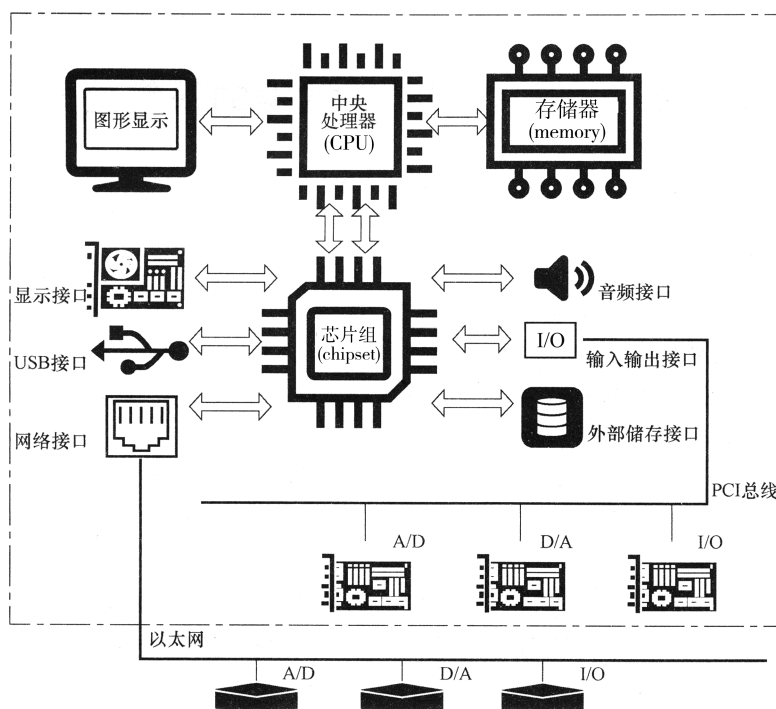


图 1-1 基于通用计算机架构的工业控制计算机系统框图

2. 存储器

存储器用于指令与信息数据的存储，以便后续进行进一步数据处理。计算能力与存储器容量有关，由于现代控制技术的飞速发展，对存储器的容量也有了更高的要求。从 20 世纪几十个字节的存储量到现在几十个 G 字节的存储量，存储器技术有了惊人的发展。

3. 芯片组

芯片组把 CPU 和其他周边设备连接起来，提供对 CPU 和对系统高速缓存的支持，以及提供主板的系统总线频率管理、内存管理、总线控制、通信与端口控制等多种功能。

4. 总线

总线是系统在主控设备的控制下，准确地在各系统间传递信息的载体或公共通路。总线



可以实现计算机系统内部、主机与外围设备之间或系统与系统之间的连接与通信。总线是构成工业计算机应用系统的重要技术，它对系统的可靠性、可扩展性和可升级性等方面具有举足轻重的作用。目前，工业计算机主要的总线有 STD 总线、PCI 总线、VME 总线、CompactPCI/PXIexpress 总线等。

5. 通信单元

通信单元包括通信控制器和通信收发器两个部分。通信控制器用来控制通信过程，确定通信的数据、地址以及建立/拆除通信的数据链路。通信收发器用来处理通信的物理层功能，包括物理引线的排列、机械特性和物理电平等。人们可根据需要设置通信单元与其他计算机或设备通信。

现代计算机的通信标准很多，常见的通信接口有 RS232/485 串行通信接口、USB 通信接口、EtherNet 接口以及其他众多的工业标准接口。

6. A/D 和 D/A 转换器

由于数字技术飞速发展与普及，对于信号的处理也广泛采用了数字化技术，当系统采集的信息是模拟量时(如电压、电流、温度、压力等)，要使计算机或数字仪表能识别、处理这些信号，必须先将这些模拟信号转换成数字信号，计算机输出的数字量也往往需要将其转换为相应模拟信号才能为执行机构所接受。这样，就需要一种能在模拟信号与数字信号之间起桥梁作用的电路——模数和数模转换器。将模拟信号转换成数字信号的电路称为模数转换器，简称 A/D 转换器(analog to digital converter)；将数字信号转换成模拟信号的电路称为数模转换器，简称 D/A 转换器(digital to analog converter)。A/D 和 D/A 转换器必须具有足够的转换精度和较高的转换速度。

7. 开关量输入输出

开关量输入输出模块是一款能够将闭合和断开两个状态信号采集输入和控制输出的单元，通常也称为数字量模块。该模块通过总线将开关量信号采集至计算机，或者计算机发送的相关指令通过模块控制开关的投入或切除。

8. 传感器

传感器的作用是把压力、温度、转速等非电量或电压、电流、功率等电量转换为对应的电压或电流的模拟信号，即转换成能被计算机接口电路接受的电平信号。现代一些新型传感器可以通过非电量采集形式进行电量变换，直接输出可被计算机接收的数字量信号，如光电互感器(optical current transformer, OCT)。

在电力系统中，以往用得比较多的为模拟变送器，它的输入量为被测参数，输出量为与其输入量成正比的直流电压或电流。也有采用交流接口的变送器，就是把电流互感器二次侧电流(电压互感器二次侧电压)经过中间变流器(或中间变压器)转换成与其成比例的、幅值较低的交流电流(或电压)。

随着数字技术和计算机的发展，以往使用的传统模拟式的传感器也将被数字化，这些传感器具有内置 A/D 转换功能，可以将模拟信号转换为易于传输的数字信号，通过数字总线接



口连接到计算机系统。由于以计算机为控制核心的自动装置越来越普及，数字化的传感器的应用也日益普遍。

（二）基于专用数字处理器的控制系统

基于专用数字处理器的计算机技术是 21 世纪计算机技术的重要发展之一，为某一特定任务设计的专用数字处理器作为计算机系统的核心，担负着控制系统工作的重要任务。其具有很强的实时多任务支持能力、微处理器结构可扩展能力、较强的中断处理能力及低功耗的特点。

专用数字处理器是控制系统运行的核心单元，可以分为微处理器、微控制器、DSP 处理器。

1. 微处理器 (micro processor unit, MPU)

微处理器是由通用计算机中的 CPU 演变而来的。它的特征是具有 32 位以上的处理器，具有较高的性能。但与计算机处理器不同的是，在实际嵌入式应用中只保留其应用任务紧密相关的功能硬件，去除其他不必要的冗余功能部分，以最低的功耗和资源实现了其特殊应用的要求。微处理器具有体积小、质量轻、成本低、可靠性高等优点。

2. 微控制器 (micro controller unit, MCU)

微控制器的典型代表是单片机，单片机芯片内部集成 ROM/EPROM、RAM、总线、总线逻辑、定时/计数器、看门狗、I/O、串行口、脉宽调制输出、A/D、D/A、FLASHRAM、EEPROM 等各种必要功能和外设。和微处理器相比，微控制器的最大特点是单片化，体积大大减小，从而使功耗和成本下降、可靠性提高。微控制器的片上外设资源一般比较丰富，适合控制，因此称作微控制器。

3. DSP 处理器 (digital signal processor, DSP)

DSP 处理器是专门用于信号处理方面的处理器，在系统结构和指令算法方面进行了特殊设计，具有很高的编译效率和指令执行速度，在数字滤波、信号分析、通信等数字信号领域方面获得了大量的应用。随着互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 技术的进步与发展，其存储容量和运算速度都得到了成倍提高，集成度更高，使用范围也更广。

DSP 处理器具备多任务处理能力，实时性好，具有模块化的软件架构，可扩展性好，功耗较低。

基于专用数字处理器的自动控制系统在电力系统中应用广泛，如在电力系统综合自动化、继电保护、自动装置以及电能计量和通信等方面都有大量的应用，其主要用于数据采集与控制。基于专用数字处理器的自动控制系统在电力系统自动装置中应用也很多，如数字式准同期并列装置、数字式励磁调节器、数字式电力系统稳定控制装置等。

（三）集散控制系统

集散控制系统又称计算机分布式控制系统，它是从 20 世纪 70 年代中期迅速发展起来的，它把计算机技术、控制技术、图像显示技术以及通信技术结合起来，实现对生产过程的监视、



控制和管理。它打破了早期计算机系统都有各自的外设这一模式的局限性，较好地解决了在一定地域范围内资源的可共享性问题。其主要依靠数据通信技术，完成信息的采集与传输，实现分布式控制和综合协调功能。其主要用于大规模连续生产过程监视与控制系统中，如电力、石化等行业，例如，电厂的生产运行过程监控，运行主管部门对运行状态的了解等。

集散控制系统的结构如图 1-2 所示。集散控制系统是计算机网络技术在工业控制系统发展的产物，系统是一个从上到下的树状系统，分为管理级、过程控制级和现场控制级，是三级分布式架构，反映了集散控制系统“分散控制、集中管理”的特点。

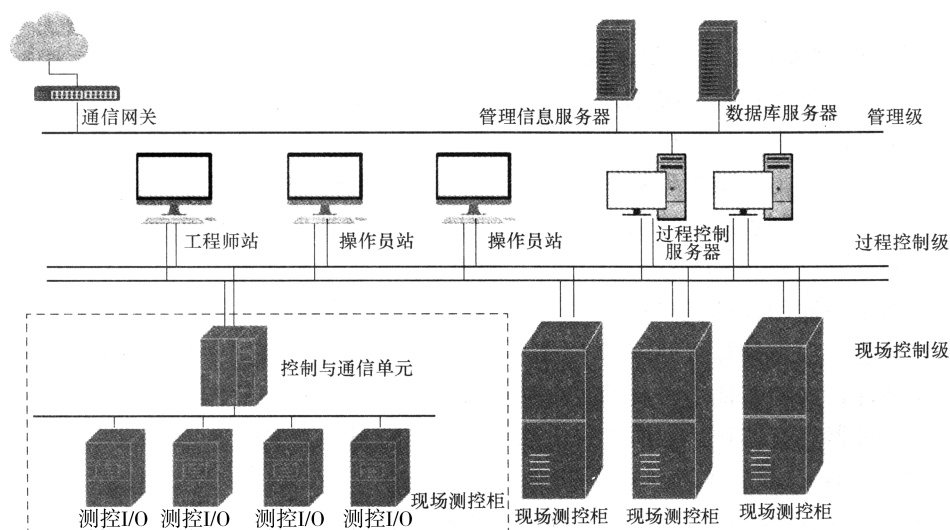


图 1-2 集散控制系统的结构示意图

1. 管理级

集散控制系统的管理级主要包括管理信息服务器、数据库服务器、通信网关等与生产管理有关的系统设备，可以使用高级应用软件的功能，完成系统管理信息的集中管理与协调、优化控制、计划管理，并实现控制系统信息的对外通信。

2. 过程控制级

过程控制级主要包括过程控制服务器、工程师站和操作员站等设备，主要完成数据的显示和记录、系统运行操作与维护、数据的存储与分析、事件报警与诊断处理、数据通信以及报表等功能。

3. 现场控制级

现场控制级主要由一系列的现场测控柜组成，每个测控柜具有控制与通信单元以及测控输入输出单元。这些单元主要完成过程信息数据的采集与转换，过程操作命令的输出与执行，完成现场控制逻辑，数据的监视与存储，实现与过程控制级的数据通信，并且可以完成对现场设备的检测与诊断。

集散控制系统可以较好地适应工业生产环境，完成系统的集中管理与分散控制，具有较好的实时性和可靠性，同时集散控制系统也具有较好的开放性、互操作性，系统结构灵活，容易改变，系统容量可以根据需要扩展。集散控制系统还具有控制功能强的优点，除了能实



现通常的控制功能外，还可实现优化控制、人工智能、自适应、自组织等高级功能。分散化的控制与系统的冗余配置可以大大提高系统的可靠性和连续运行能力，所以目前集散控制系统的应用较为广泛。

（四）基于计算机网络系统的广域控制系统

基于计算机网络系统的广域控制系统主要采用现代计算机技术发展的成果，将分布于各处的不同计算机控制系统，通过网络连接起来，互相传输信息，协同工作，以达到更好的控制效果。电力系统一般采用以光纤作为介质主干的计算机控制通信网络，该网络是连接电力系统各级调度控制中心与其所属系统各发电厂、变电站中各检测装置、自动装置和控制器的纽带，结合电力系统能量管理系统（energy manage system，EMS）软件可实现在广泛地域的“四遥”（遥信、遥测、遥控、遥调）功能。本部分内容与电力系统通信技术和调度自动化有关，将在专门的课程上讲授。

二、软件

现在电力系统自动装置本质上是一台专用的控制计算机，它的工作主要是根据存储在系统内的程序(软件)指令来完成。电力系统自动装置的软件随着具体应用的不同，其规模、功能及所采用的技术也不相同，因此这里只介绍最基本的内容。编制程序的人员，还必须要了解自动装置的工作要求、运行规章等专业知识。

（一）信号采集与处理程序

信号采集与处理程序的主要功能是对输入信号进行采集、标度变换、滤波处理及计算，并将数据存入相应地址的存储单元，供程序需要时调用。

（二）运行参数设置程序

运行参数设置程序的主要功能是对系统的运行参数进行设置。运行参数有采样通道号、采样点数、采样周期、信号量程范围和工程单位等。

（三）系统管理(主控制)程序

系统管理程序首先是用来将各个功能模块组织成一个完整的按程序执行的系统，并管理和调用各个功能模块程序，其次是用来管理数据文件的调用、存储和输出。

（四）通信程序

通信程序用来完成本机与各个通信节点之间的数据传递工作，或用来完成主节点与从节点之间的数据传递，其主要的工作包括设置数据传输的波特率、数据发送的发起、数据发送发起的响应、数据接收的响应及数据传输的校验、数据传输成功的标志等。

以上介绍的系统软件功能模块划分只是一个简单的示例，不同的系统有不同的划分。例



如,在工业控制机、集散控制等系统中,还需显示软件、键盘扫描与分析程序、实时监控程序等软件功能模块。

第二节 采样、量化与编码技术

一、采样

(一) 采样过程

对连续的模拟信号 $x(t)$ 按一定的时间间隔 T_s , 抽取相应的瞬时值, 这个过程称为采样。采样过程就是一个在时间和幅值上连续的模拟信号 $x(t)$, 通过一个周期性开闭(周期为 T_s , 开关闭合时间为 τ) 采样开关 S 后, 在开关输出端输出一串在时间上离散的脉冲信号 $x_s(nT_s)$ 。

采样后的脉冲信号 $x_s(nT_s)$ 为采样信号。0, T_s , $2T_s \cdots$ 各点为采样时刻, τ 为采样时间, T_s 称为采样周期, 其倒数 $f_s = 1/T_s$, 称为采样频率。在实际应用中, $\tau \ll T_s$ 。

采样过程可以看作脉冲调制过程, 采样开关可以看作调制器。输入信号与输出信号之间的关系可以表达为

$$x_s(nT_s) = x(t)\delta_T(t) = x(t) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT_s) \quad (1-1)$$

式中, $\delta_T(t)$ ——采样开关控制信号。

因为 $\tau \ll T_s$, 所以可以假设采样脉冲为理想脉冲, 在脉冲出现瞬间 nT_s 取值为 $x(nT_s)$, 故式(1-1)可以改写为

$$x_s(nT_s) = x(t)\delta_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(nT_s)\delta(t - nT_s) \quad (1-2)$$

考虑到时间为负值, 无物理意义, 式(1-2)可以改写成

$$x_s(nT_s) = \sum_{n=0}^{+\infty} x(nT_s)\delta(t - nT_s) \quad (1-3)$$

式(1-3)表明, 采样开关输出的采样信号 $x_s(nT_s)$ 是由一系列脉冲组成的, 其数学表达式是两个乘积的和式。

(二) 采样定理

采样周期 T_s 决定了采样信号的质量和数量。 T_s 太小, 会使 $x_s(nT_s)$ 的数据剧增, 占用大量的内存单元; T_s 太大, 会使模拟信号的某些信息丢失, 当将采样后的信号恢复成原来的信号时, 就会出现信号失真现象, 失去应有的精度。因此, 选择采样周期 T_s 必须有一个依



据, 以保证 $x_s(nT_s)$ 能不失真地恢复原信号 $x(t)$, 这个依据就是采样定理。

采样定理是采样过程中所遵循的基本定律, 它指出了重新恢复连续信号所必需的最低采样频率, 下面详细解释。

设理想采样后的信号如式(1-2)所示, 其中, 脉冲信号序列 $\delta_T(t)$ 是以采样间隔 T_s (为了方便起见, 在下面的叙述中, T_s 用 T 代替) 为周期的周期性函数, 所以可以用傅里叶级数展开

$$\delta_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_m e^{jm \frac{2\pi}{T} t} \quad (1-4)$$

其中

$$c_m = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT) e^{-jm \frac{2\pi}{T} t} dt$$

式中, 级数的基频即采样频率 $f_s = \frac{1}{T}$, 采样角频率 $\Omega_s = \frac{2\pi}{T}$ 。

在积分区间 $\left[-\frac{T}{2}, \frac{T}{2}\right]$ 内, 只有一个采样脉冲 $\delta(t)$, 因此

$$c_m = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \delta(t) e^{-jm \frac{2\pi}{T} t} dt = \frac{1}{T} \quad (1-5)$$

由此可得

$$\delta_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT) = \frac{1}{T} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} e^{jm \frac{2\pi}{T} t} \quad (1-6)$$

式(1-6)表明, 脉冲序列的各次谐波的幅值都等于 $\frac{1}{T}$, 其梳状谱结构如图 1-3(b)所示。

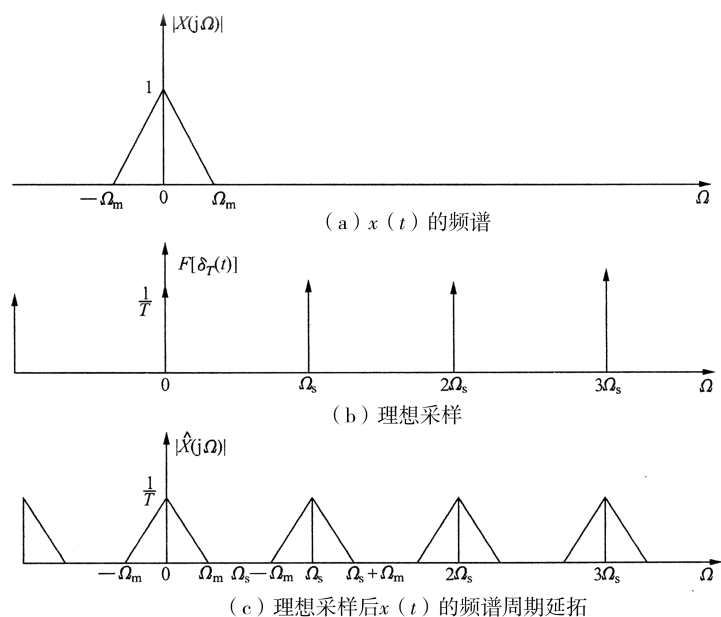


图 1-3 理想采样信号的频谱

采样信号 $x_s(nT_s)$ [为了方便起见, 在下面的叙述中, $x_s(nT_s)$ 用 $x_s(t)$ 代替] 的频谱为

$$\hat{X}(j\Omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_s(t) e^{-j\Omega t} dt = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \delta_T(t) e^{-j\Omega t} dt \quad (1-7)$$



将式(1-6)代入式(1-7)得

$$\hat{X}(j\Omega) = \frac{1}{T} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j(\Omega - m\Omega_s)t} dt \quad (1-8)$$

原连续时间信号 $x(t)$ 的频谱为

$$X(j\Omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\Omega t} dt \quad (1-9)$$

设 $x(t)$ 的频谱如图 1-3(a) 所示, 比较式(1-8)和式(1-9), 可得

$$\hat{X}(j\Omega) = \frac{1}{T} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} X[j(\Omega - m\Omega_s)] \quad (1-10)$$

由此可见, 一个连续的时间信号经过理想采样后频谱发生了两个变化: 一是乘以 $\frac{1}{T}$ 因子; 二是出现了无穷多个分别以 $\pm\Omega_s, \pm2\Omega_s \dots$ 为中心的和 $\frac{1}{T}X(j\Omega)$ 状完全一样的频谱, 即频谱产生了周期延拓, 如图 1-3(c) 所示。因为频谱是复数, 这里只画了其幅度。这种频谱周期延拓的现象可以从脉冲调制角度解释。根据频域卷积定理, 时间上相乘的信号, 其频谱相当于原来两个时间函数频谱的卷积。由于脉冲函数序列具有如图 1-3(b) 所示的梳状谱, 因而 $X(j\Omega)$ 与 $\delta_T(t)$ 的梳状谱的卷积就是简单地将 $X(j\Omega)$ 在 $\delta_T(t)$ 各次谐波坐标位置上重新构图, 因此出现了频谱 $X(j\Omega)$ 的周期延拓。由此可以得到一个结论: 在时域的采样, 形成频域的周期函数, 其周期等于采样角频率 Ω_s 。

设 $x(t)$ 是带限信号, 其频谱满足 $0 \leq \Omega \leq \Omega_m$, Ω_m 是可能的最高频率, 如图 1-3(a) 所示, 其频谱称为基带频谱。当 $\Omega_s \geq 2\Omega_m$ 时, 理想采样信号频谱中, 基带频谱以及各次谐波调制频谱彼此不重叠, 如图 1-3(c) 所示。这样就得到一个重要的不等式

$$\Omega_s \geq 2\Omega_m \quad (1-11)$$

这就是著名的香农(Shannon)采样定理, 即采样频率必须大于原模拟信号频谱中最高频率的两倍, 则模拟信号可由采样信号来唯一表示。

二、量化与编码

(一) 量化

连续模拟信号经过采样后, 成为时间上离散的采样值, 其幅值在采样时间 τ 内依然是连续的。采样幅值仍然是模拟量。如用模拟表计, 其读数理论上十分精确, 实际上受精度的制约, 其有效值一般不超过 4 位。为了能用计算机处理数据, 采样值需转化成数字量, 也就是将采样信号的幅值用二进制代码表示。由于二进制代码的位数是有限的, 只能代表有限个信号的电平, 故在编码之前先要对采样信号进行量化。

量化就是把采样信号的幅值与某个最小数量单位的一系列整数倍比较, 以最接近于采样信号幅值的最小数量单位倍数来表示该幅值。设 N 为数字量的二进制代码位数, 量化单位定义为量化器满量程电压值 U_{FSR} (full scale range) 与 2^N 的比值, 用 q 表示, 即



$$q = \frac{U_{FSR}}{2^N} \quad (1-12)$$

量化方法可以采用“有舍有入”的量化方法。“有舍有入”的量化过程如图 1-4 所示，即将信号幅值分为若干层，各层的间隔相等，且等于量化单位 q 。当信号幅值小于量化单位 $q/2$ 时，舍去；当信号幅值大于量化单位 $q/2$ 但小于量化单位 q 时，进一个量化单位。这种量化方法引起的误差可控制在较小的范围，通常精度不低于模拟表计，因此目前大部分 A/D 转换器均采用这种量化方法。

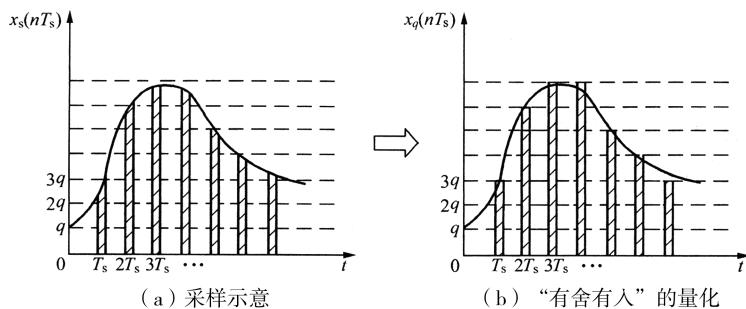


图 1-4 “有舍有入”的量化过程

(二) 编码

把量化信号的数值用二进制代码表示，就称为编码。

二进制的数码由多个码位组成，数码最左端的码位叫最高有效位，用符号 MSB 表示；数码最右端的码位叫最低有效位，用符号 LSB 表示。每个码位有“0”“1”两个状态，量化引入的最大误差为 $\pm \frac{1}{2} \text{LSB}$ 。

量化和编码都是由 A/D 转换器完成的。

逐次逼近式 A/D 转换器原理电路示意图如图 1-5 所示。它由逐次逼近寄存器 SAR、D/A 转换器、比较器、时序及控制逻辑等组成。

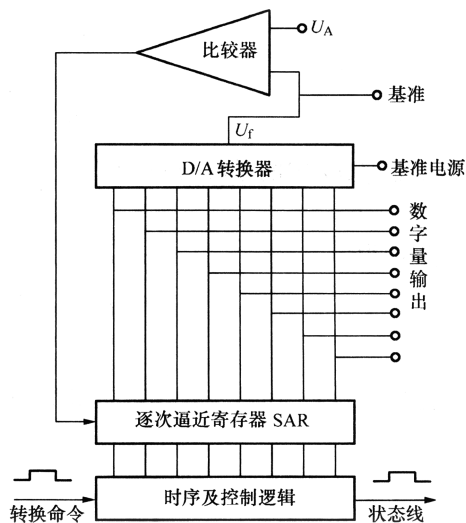


图 1-5 逐次逼近式 A/D 转换器原理电路图



其工作过程如下：当发出“转换命令”，SAR 寄存器清零后，控制电路先设定 SAR 中的最高位为“1”，其余为“0”，此预测数据被送至 D/A 转换器，转换成电压 U_f ，然后将 U_f 与输入的模拟电压 U_A 在比较器中进行比较（比较器为高增益运算放大器，输出逻辑为 0 或 1）。若 $U_A \geq U_f$ ，则保留 SAR 最高位为“1”；若 $U_A < U_f$ ，则最高位“1”清为“0”。然后对次高位进行转换、比较和判断，决定次高位应取“1”还是“0”。重复上述过程，直至确定 SAR 最低位是“0”还是“1”为止。这个过程完成后，状态线就改变状态，表示已完成一次完整的转换。最后 SAR 中的内容就是与输入的模拟电压对应的二进制数字代码。逐次逼近寄存器 SAR 的位数越多，越能精确地逼近模拟信号，在确定的转换节拍下，其转换时间也越长。

第三节 交流采样的电量计算和前置算法

当采用传统电量变送器时，其输出直流量与输入量相对应，通过 A/D 转换后可直接运用。当交流采样时，则需要进行以下的处理。

一、交流采样的电量计算

（一）电压/电流量计算

对于一个周期性信号 $f(t) = f(t+T)$ ，在满足一定条件下可展开成傅里叶级数

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \quad (1-13)$$

式中， n ——自然数； a_n ， b_n ——分别为 n 次谐波的余弦和正弦的振幅。

根据傅里叶级数可得

$$\begin{cases} a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos n\omega_0 t dt \\ b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin n\omega_0 t dt \\ \omega_0 = \frac{2\pi}{T} \\ a_0 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt \end{cases} \quad (1-14)$$

因此，基频分量 ($n=1$) 的傅里叶余弦和正弦系数分别为



$$\begin{cases} a_1 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos \omega_0 t dt \\ b_1 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin \omega_0 t dt \end{cases} \quad (1-15)$$

于是 $f(t)$ 中的基频分量为

$$f_1(t) = a_1 \cos \omega_1 t + b_1 \sin \omega_1 t \quad (1-16a)$$

整理得

$$\begin{aligned} f_1(t) &= \sqrt{2} F \cos(\omega_1 t + \theta) \\ &= \sqrt{2} F (\cos \omega_1 t \cos \theta - \sin \omega_1 t \sin \theta) \end{aligned} \quad (1-16b)$$

比较式(1-16a)、式(1-16b)，得

$$\begin{aligned} a_1 &= \sqrt{2} F \cos \theta \\ b_1 &= -\sqrt{2} F \sin \theta \end{aligned}$$

所以

$$F = \sqrt{\frac{a_1^2 + b_1^2}{2}} \quad (1-17)$$

以电压量为例，对于基频分量，离散数字信号式的积分改为求和，若每周采样 N 次，则得第 K 次采样时的电压基频分量的傅里叶实部 U_R 和虚部 U_I 如式(1-18)所示：

$$\begin{cases} U_R = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} U_{[K-(N-1-m)]} \cos\left(\frac{2\pi}{N}m\right) \\ U_I = -\frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} U_{[K-(N-1-m)]} \sin\left(\frac{2\pi}{N}m\right) \end{cases} \quad (1-18)$$

显然，基频信号的幅值 U_m 和初相角 θ 分别为

$$\begin{aligned} U_m &= \sqrt{U_R^2 + U_I^2} \\ \theta &= \arctan\left(\frac{U_I}{U_R}\right) \end{aligned}$$

若取 $N=12$ ，即一个工频周期内采样 12 点，则根据式(1-18)傅里叶采样算法，基波信号的实部和虚部分别为

$$U_R = \frac{1}{6} [U_0 - U_6 + \frac{\sqrt{3}}{2} (U_1 + U_{11} - U_5 - U_7) + \frac{1}{2} (U_2 + U_{10} - U_4 - U_8)] \quad (1-19)$$

$$U_I = -\frac{1}{6} [U_3 - U_9 + \frac{\sqrt{3}}{2} (U_2 + U_4 - U_8 - U_{10}) + \frac{1}{2} (U_1 + U_5 - U_7 - U_{11})] \quad (1-20)$$

式中， $U_0 \sim U_{11}$ ——采样值。

运用式(1-19)和式(1-20)，可以计算交流电压基波信号的实部和虚部分量，从而计算出幅值和相位角。

同理，可以方便地得到交流电流量采样的计算方法。

(二) 有功功率和无功功率的计算

对于三相功率的计算，表达式随采集的信号不同而不同，主要可分为“三表法”和“两



表法”。

采用“三表法”，即采集发电机定子三相电压和电流，则功率如式(1-21)所示，式中变量下标 A、B、C 分别代表 A、B、C 三相，下标 R、I 分别代表傅里叶实部和虚部。

$$\begin{aligned}
 S &= \dot{U}_A \dot{I}_A + \dot{U}_B \dot{I}_B + \dot{U}_C \dot{I}_C \\
 &= (U_{AR} + jU_{AI})(I_{AR} - jI_{AI}) + (U_{BR} + jU_{BI})(I_{BR} - jI_{BI}) + (U_{CR} + jU_{CI})(I_{CR} - jI_{CI}) \\
 &= (U_{AR} I_{AR} + U_{AI} I_{AI} + U_{BR} I_{BR} + U_{BI} I_{BI} + U_{CR} I_{CR} + U_{CI} I_{CI}) \\
 &\quad + j(U_{AI} I_{AR} - U_{AR} I_{AI} + U_{BI} I_{BR} - U_{BR} I_{BI} + U_{CI} I_{CR} - U_{CR} I_{CI})
 \end{aligned} \quad (1-21)$$

即

$$P = U_{AR} I_{AR} + U_{AI} I_{AI} + U_{BR} I_{BR} + U_{BI} I_{BI} + U_{CR} I_{CR} + U_{CI} I_{CI} \quad (1-22)$$

$$Q = U_{AI} I_{AR} - U_{AR} I_{AI} + U_{BI} I_{BR} - U_{BR} I_{BI} + U_{CI} I_{CR} - U_{CR} I_{CI} \quad (1-23)$$

采用“二表法”，量测 $\dot{U}_{AB}$ 、 $\dot{U}_{CB}$ 、 $\dot{I}_A$ 和 $\dot{I}_C$ ，则有

$$S = \dot{U}_{AB} \dot{I}_A + \dot{U}_{CB} \dot{I}_C \quad (1-24)$$

$$P = U_{ABR} I_{AR} + U_{ABI} I_{AI} + U_{CBR} I_{CR} + U_{CBI} I_{CI} \quad (1-25)$$

$$Q = U_{ABI} I_{AR} - U_{ABR} I_{AI} + U_{CBI} I_{CR} - U_{CBR} I_{CI} \quad (1-26)$$

在上述功率计算中所用的电压、电流均为有效值。

(三) 功角的计算

如图 1-6 所示，功角分为内角和外角。内功角 δ_i 是指发电机假想转子电动势相量 $\dot{E}_q$ 和机端电压 $\dot{U}_G$ 之间的夹角。外功角 δ_a 是 $\dot{E}_q$ 与系统电压 $\dot{U}_x$ 之间的夹角， δ_a 对发电机的稳定运行有决定性意义。

图 1-6 中， X_e 为发电机外部网络电抗 ($X_e = X_T + X_L$ ， X_T 为变压器电抗， X_L 为线路电抗)， X_d 为发电机直轴同步电抗， X_q 为横轴同步电抗。

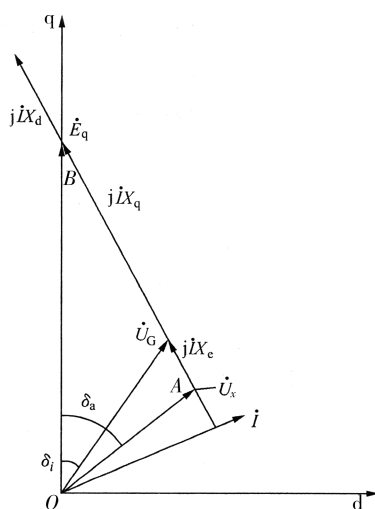


图 1-6 计算发电机功角相量图

由图 1-6 可知



$$\dot{E}_q = \dot{U}_G + j\dot{I}X_q$$

$$\dot{U}_x = \dot{U}_G - j\dot{I}X_c$$

在 $\triangle OAB$ 中, 令 $\overline{OB}=a$, $\overline{OA}=b$, $\overline{AB}=c$, 则

$$\delta_a = \cos^{-1} \left(\frac{c^2 - b^2 - a^2}{-2ab} \right) \quad (1-27)$$

二、输入数据的前置处理

计算机采集的模拟量种类繁多, 且每种量测范围又很不一致。通常先用各种传感器(变送器)把这些模拟量转换成相应的电流或电压信号, 再通过 A/D 转换器变换成数字量后送入计算机。经过 A/D 转换读入的数据, 以不同的通道号代表不同的物理量, 存入指定的存储单元。

上述数据还要进行一系列简单处理——前置处理, 然后存入数据库。数据前置处理流程如图 1-7 所示。数据的前置处理可以剔除错误数据、消除采样误差、滤除噪声干扰及确定量值, 目的是希望最终得到较接近实际的数据。

(一) 标度变换

进入 A/D 转换器的信号一般是电平信号, 但其意义却有所不同。例如同样是 5 V 电压, 可以代表 540 °C 蒸汽温度, 也可以代表 500 A 电流、110 kV 电压等。因此, 经 A/D 转换后的同一数字量所代表的物理意义可以是不相同的, 所以要用 A/D 转换后的数字量乘上不同的系数进行标度变换, 把它们恢复到原来的量值。

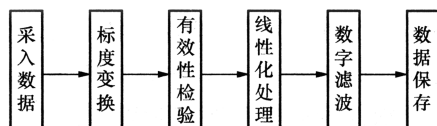


图 1-7 数据前置处理流程

(二) 数据的有效性检验

数据的有效性检验的目的是判断采入的数据是否有明显的出错或为干扰信号等, 可根据物理量的特性来判断。

(1) 变化缓慢的参数, 可用同一参数前、后周期的变化量来判断。若后一周期内的变化量超过一定范围, 与规律不符, 则可认为该数据是不可信的“坏”数据。

(2) 利用相关参数间的关系互相校核。例如, 励磁电压与励磁电流之间有较强的相关性, 可以互相校核。当励磁电压升高时, 励磁电流必定按一定关系上升, 不符合这种情况的数据是不可信的。

(3) 对于一些重要参数, 可以用两个测点或在同一测点上装两台变送器, 用它们之间的差值进行校核。差值超过一定数值的数据是不可信的。对于可疑数据, 需进一步判别。



(4) 限制判断。当数据超过其可能最大变化范围时, 该数据不可信。

可见, 根据量值的类型选择合适的判断方法, 达到可信目的, 即是数据有效性检验的任务。

(三) 线性化处理

有的变送器的输出信号与被测参数之间可能呈非线性关系, 为了提高测量精度, 可采取线性拟合措施, 以消除传感器或转换过程引起的非线性误差。

(四) 数字滤波

采用数字滤波可以减少或避免阻容元件滤波引起大的时间滞后, 减少噪声在信号中的比重。常用的数字滤波方法有以下三种。

(1) 算术平均法。对测量对象进行多次采样, 取其平均值作为测量值, 即

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1-28)$$

式中, $\bar{Y}$ ——平均值; X_i ——第 i 次测量值; n ——采样次数。

采样次数越多, 滤波效果越好, 但所需时间越长。

(2) 加权平均法。对本次测量值 X_n 和前 k 次测量值 $X_{n-1}, X_{n-2}, \dots, X_{n-k}$ 进行加权平均, 得到的值作为本次的测量值 Y_n , 即

$$Y_n = \sum_{i=0}^k a_i X_{n-i} \quad (1-29)$$

其中

$$0 \leq a_i \leq 1, \quad \sum_{i=0}^k a_i = 1$$

式中, a_i ——加权系数; Y_n ——第 n 次加权平均值; X_{n-i} ——第 $n-i$ 次的测量值。

(3) 一阶递归滤波。根据对上一次量测的滤波值与本次测量值进行加权平均而得到本次量测的滤波值, 即

$$Y_n = \beta X_n + (1-\beta)Y_{n-1} \quad (1-30)$$

式中, Y_n, Y_{n-1} ——分别为第 n 次, 第 $n-1$ 次的量测滤波值; X_n ——第 n 次测量值; β ——滤波系数, 其值小于 1.0 而大于 0。

自动装置的结构、数据采集和处理是数字式自动装置的基本技术, 本书做了简要介绍。如今通信技术几乎成为自动装置必不可少的部分, 涉及交换信息的通信问题也很值得一提。另外, 通信的介质也不局限于导线, 光纤通信以其高速、可靠的优势而广为应用。由于通信技术飞跃发展, 其已形成了系统性很强的专门学科, 建议读者选读或参阅相关教材。



思考题

- (1) 电力系统自动装置硬件的基本结构形式主要有哪几种组成？
- (2) 简述软件要求及电网运行信息的采集和信号处理等的基本工作原理。
- (3) 交流采样电压为 U ，傅里叶分解后的 a_0 、 a_n 、 b_n 的物理意义是什么？
- (4) 常用的数字滤波方法有哪几种？

第二章

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，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，内容也较为烦琐。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发电厂的同期点。如图 2-1 所示，每台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，为了减少并列操作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；110 kV 及以上线路，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列操作；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；



图 2-1 发电厂的同期点举例 (* 表示同期点)

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。

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

$$\begin{cases} u_{\text{G}} = U_{\text{Gm}} \sin(\omega_{\text{G}} t + \varphi_{0\text{G}}) \\ u_{\text{S}} = U_{\text{Sm}} \sin(\omega_{\text{S}} t + \varphi_{0\text{S}}) \end{cases} \quad (2-1)$$

式中, $U_{\text{Gm}}, U_{\text{Sm}}$ ——发电机电压和系统电压的幅值; $\omega_{\text{G}}, \omega_{\text{S}}$ ——发电机电压和系统电压的角频率; $\varphi_{0\text{G}}, \varphi_{0\text{S}}$ ——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衡量电压的三个重要的状态量。图 2-2 为发电机与系统并列示意图。图 2-2 (a) 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 2-2 (b) 所示。

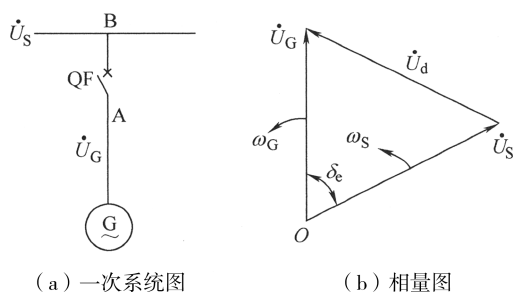


图 2-2 发电机与系统并列示意图

当电网参数一定时, $\dot{U}_d$ 值越大, 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

$$\begin{cases} \omega_G = \omega_s \text{ 或 } f_G = f_s \\ \dot{U}_G = \dot{U}_s \\ \delta_e = 0 \end{cases} \quad (2-2)$$

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, 图 2-2 (b) 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。自同期并列示意图如图 2-3 所示。

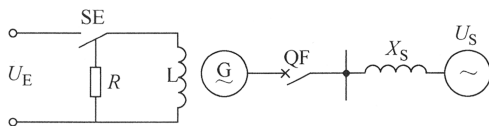


图 2-3 自同期并列示意图

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

$$I_m'' = \frac{U_s}{X_d'' + X_s} \quad (2-3)$$

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。

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，即式(2-2)，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(2-2)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(2-2)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 2-4 (a) 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

$$I_m'' = \frac{U_G - U_s}{X_d'' + X_s} \quad (2-4)$$

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 2-4 (a) 可见，冲击电流主要为无功电流分量，其瞬时最大值为

$$i_m'' = 1.8\sqrt{2}I_m'' \quad (2-5)$$

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。

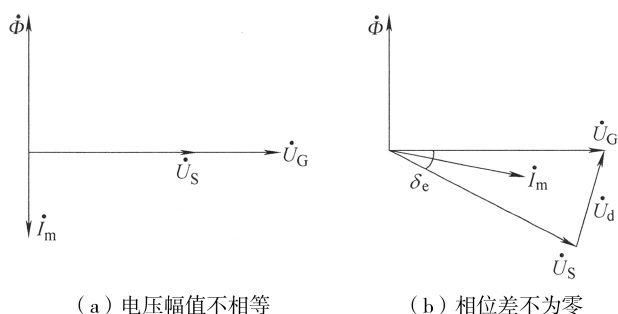


图 1-4 准同期并列条件分析

(二) 相位不相同

设并列合闸时断路器两侧电压相量如图 2-4 (b) 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

$$I_m'' = \frac{2U_G}{X_q'' + X_s} \sin \frac{\delta_e}{2} \approx \frac{U_G}{X_q'' + X_s} \sin \delta_e \quad (2-6)$$

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(2-5), 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, 又有无功分量, 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 2-5 (a) 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 2-5 (b) 所示, 脉振电压 u_d 为

$$u_d = U_{Gm} \sin(\omega_G t + \varphi_{0G}) - U_{Sm} \sin(\omega_s t + \varphi_{0S}) \quad (2-7)$$

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

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

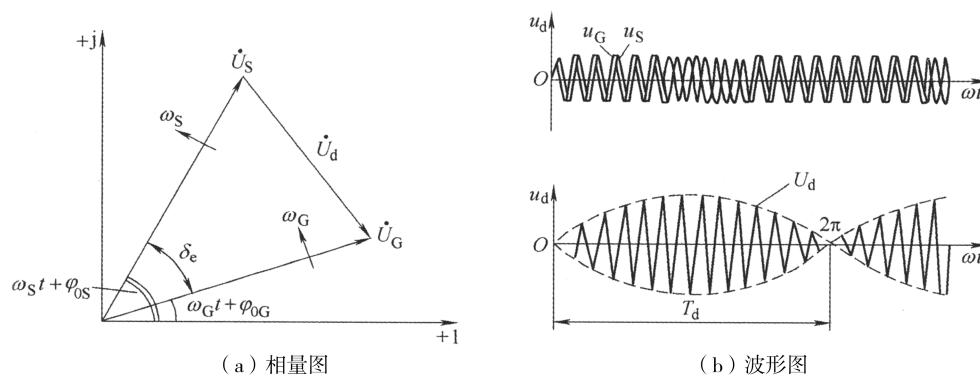


图 2-5 脉振电压

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

$$u_d = U_d \cos\left(\frac{\omega_G + \omega_s}{2}t\right) \quad (2-9)$$

由式(2-9)可见，脉振电压 u_d 的波形可看成幅值为 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频率，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

$$\begin{cases} f_d = f_G - f_s \\ \omega_d = \omega_G - \omega_s \end{cases} \quad (2-10)$$

图 2-5 (a) 所示两电压相量的相位差 δ_e 为

$$\delta_e = \omega_d t \quad (2-11)$$

因此，脉振电压的幅值 U_d 又可表示为

$$U_d = 2U_{Gm} \sin \frac{\omega_d t}{2} = 2U_{Gm} \sin \frac{\delta_e}{2} = 2U_{Sm} \sin \frac{\delta_e}{2} \quad (2-12)$$

由图 2-5 (b) 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，当相位差 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。 $\dot{U}_d$ 旋转一周的时间称为一个脉振周期，用 T_d 表示。 T_d 与转差频率 f_d 及转差角频率 ω_d 的关系为

$$T_d = \frac{1}{f_d} = \frac{2\pi}{\omega_d} \quad (2-13)$$

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 $\omega_d \leq 0.2\% \omega_N$ ， $f_N = 50 \text{ Hz}$ ，即

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

对应的脉动电压周期 T_d 为

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



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(2-11)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。若刚好在 $\delta_e = 0$ 时合上并列断路器触头, 则合闸瞬间的冲击电流等于零; 若在 $\delta_e = \pi$ 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。另外需要指出, 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(2-12)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 2-6 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 2-6 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。

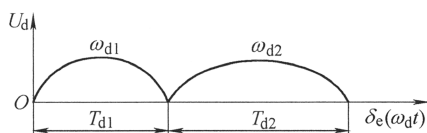


图 2-6 $U_G = U_s$ 时脉振电压 U_d 的波形

图 2-7 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 2-5 (a) 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:

$$U_d = \sqrt{U_{Gm}^2 + U_{Sm}^2 - 2U_{Gm}U_{Sm}\cos\delta_e} \quad (2-14)$$

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 2-7 中, 脉振电压的最小值反映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。

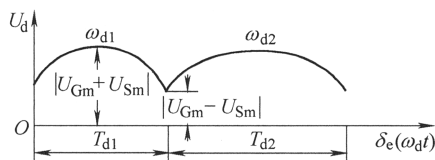


图 2-7 $U_G \neq U_s$ 时脉振电压 U_d 的波形

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。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,即使在一个脉振周期内, ω_d 也是变化的。但为了简化分析,在图2-6和图2-7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。在两电源间存在电压差和频率差时,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,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2-8所示。

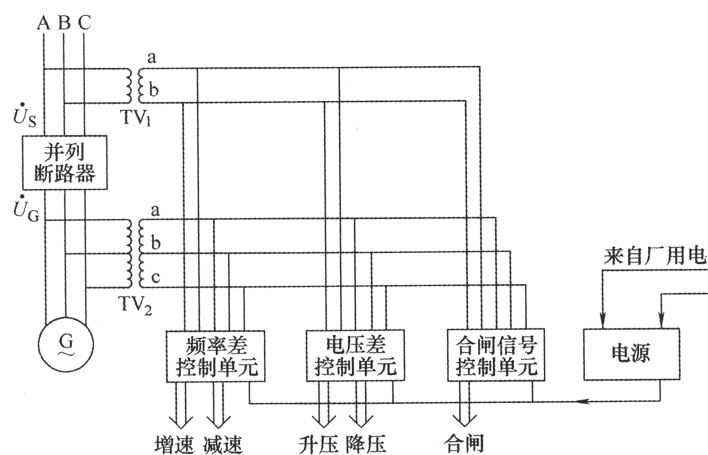


图 2-8 准同期并列装置主要组成部件

(1) 频率差控制单元:其作用是检测发电机电压与系统电压间的转差角频率 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,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、频率差的大小并进行调整，当并列条件满足时，选择合适的时间操作断路器合闸。

在手动准同期并列装置中，待并发电机电压和频率完全由操作人员手动调节，使其分别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，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，待并发电机的电压和频率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装置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，直到电压差和频率差符合要求后，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，这样就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控制单元，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。

在自动准同期并列装置中，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 $\delta_c = 0$ 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 $\delta_c = 0$ 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

$$t_{YJ} = \frac{\delta_{YJ}}{\omega_d} \quad (2-15)$$

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 $t_{YJ} = \delta_{YJ} / \omega_{d1}$ ，若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 2-9 表示。

在图 2-9 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 $\omega_d > \omega_s$)。图 2-9 (a) 中 $\omega_d = \omega_{d1}$ ，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，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 2-9 (b) 所示。

(2) 当 $\omega_d = \omega_{d3} < \omega_{d1}$ 时，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 2-9 (c) 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。

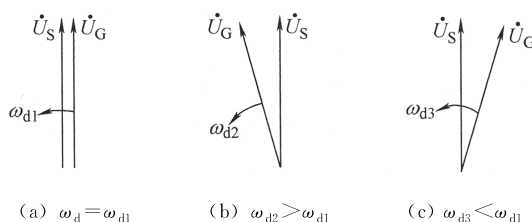


图 1-9 恒定越前相位原理分析

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。由于越前时间是固定的，因此，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。若越前时间 $t_{YJ} = t_C + t_{QF}$ ，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，因而合闸时仍难免存在合闸相位误差。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

$$t_{YJ} = t_C + t_{QF} \quad (2-16)$$

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

$$U_d \leq (0.1 \sim 0.15) U_N \quad (2-17)$$

(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(2-6)求出。假设发电机允许的最大冲击电流为 i_m'' ,则合闸时允许的最大相位误差 δ_{eY} 为

$$\delta_{eY} = \arcsin \frac{i_m'' (X_q'' + X_s)}{1.8 \times \sqrt{2} U_G} \quad (2-18)$$

在时间误差一定的条件下,相位差 δ_e 与转差角频率 ω_d 成正比。因此,由式(2-18)可求得允许转差角频率 ω_{dY} 为

$$\omega_{dY} = \frac{\delta_{eY}}{|\Delta t_C| + |\Delta t_{QF}|} \quad (2-19)$$

式中, $|\Delta t_C|$, $|\Delta t_{QF}|$ ——并列装置出口继电器和断路器的动作误差时间。

【例 2-1】 某发电机采用自动准同期并列方式与系统并列,系统的参数已归算到以发电机额定容量为基准的标么值。一次系统参数:发电机交轴次暂态电抗 $X_q'' = 0.125$;系统等值机组的交轴次暂态电抗与线路电抗为 0.25;断路器合闸时间 $t_{QF} = 0.5$ s,它的最大误差时间为 $\pm 20\%$;自动并列装置的最大误差时间为 ± 0.05 s;待并发电机允许的最大冲击电流值为 $i_m'' = \sqrt{2} I_{GN}$ 。试计算允许合闸误差角 δ_{eY} 、允许转差角频率 ω_{dY} 及相应的脉振电压周期 T_d 。

解: (1) 允许合闸误差角 δ_{eY}



$$\delta_{eY} = \arcsin \frac{i_m''(X_q'' + X_s)}{1.8 \times \sqrt{2} U_G} = \arcsin \frac{\sqrt{2} \times 1 \times (0.125 + 0.25)}{1.8 \times \sqrt{2} \times 1.05} \approx \arcsin 0.1984 \approx 0.199 \text{ (rad)}$$

式中, U_G 按 1.05 计算是考虑到并列时电压有可能超过额定电压的 5%。

(2) 断路器的最大合闸时间误差: $\Delta t_{QF} = 0.5 \times 0.2 = 0.1 \text{ (s)}$

自动并列装置的误差时间: $\Delta t_c = 0.05 \text{ s}$

允许转差角频率 ω_{dY}

$$\omega_{dY} = \frac{0.199}{0.1 + 0.05} \approx 1.33 \text{ (rad/s)}$$

(3) 脉振电压周期 T_d

$$T_d = \frac{2\pi}{\omega_{dY}} = \frac{2\pi}{1.33} \approx 4.7 \text{ (s)}$$

上述计算结果表明, 若要并列产生的冲击电流不超过 $\sqrt{2} I_{GN}$, 则合闸时的转差角频率应小于 1.33 rad/s。

第三节 频率差的测量及调整

一、并列装置的控制逻辑

恒定越前时间型准同期并列装置的合闸信号控制单元由转差角频率检测、电压差检测和越前时间信号等环节组成, 其控制逻辑如图 2-10 (a) 所示。由图可见, 恒定越前时间信号能否通过与门 Y1 成为合闸信号, 取决于转差角频率检测和电压差检测的结果。如果其中任何一个不符合并列条件, 由或非门 H1 输出的非逻辑信号将使与门 Y1 闭锁, 使得越前时间信号不能通过与门 Y1, 也就不能发出合闸信号。只有当转差角频率和电压差都符合并列条件时, 越前时间信号才能通过与门 Y1 成为合闸信号输出。由此可见, 在一个脉振电压周期内, 必须在越前时间信号到达之前完成频率差和电压差的检测, 以决定是否让越前时间信号通过与门, 也就是决定是否允许并列合闸。

如果在一个脉振周期中, 转差角频率和电压差的大小恒定不变, 那么在脉振电压的前半周期和后半周期进行检测是一样的。但从前面的分析知道, 随着发电机频率和电压的不断调节, 转差角频率及电压差是变化的, 即在一个脉振周期的前半周期和后半周期是不一样的。显然, 在脉振电压的后半周期进行频率差和电压差的检测更为合理。电压差检测、频率差检测与越前时间信号间的配合如图 2-10 (b) 所示。

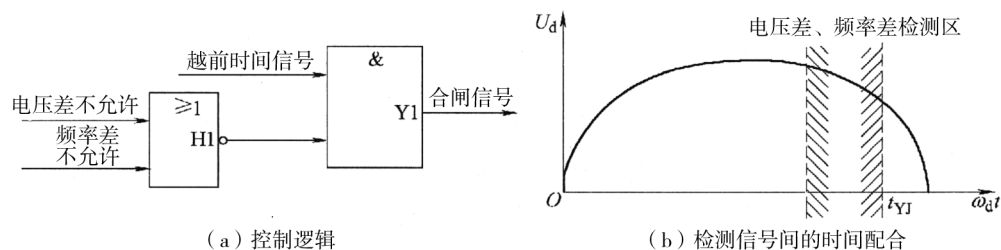


图 2-10 自动准同期并列装置的控制逻辑

二、相位差的检测

在准同期并列装置中,根据相位差的变化轨迹可求得频率差的值,而且恒定越前时间的形成是通过测量相位差的变化实现的。

相位差的测量逻辑电路如图 2-11 所示,发电机电压 u_G 和系统电压 u_S 经过电压变换和整形方波电路变为矩形波后,将两个方波接入异或门。当两个方波输入电平不同时,异或门的输出为高电平;当两个方波同为高电平或同为低电平时,异或门输出低电平。

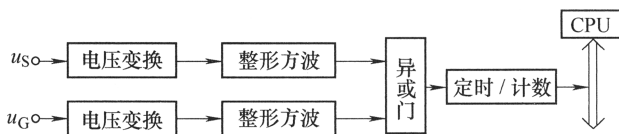


图 2-11 相位差的测量逻辑电路

设系统电压频率为 50 Hz,发电机电压频率低于 50 Hz,其波形如图 2-12 (a) 所示;经电压变换电路和整形方波削波限幅后的方波如图 2-12 (b) 所示;两方波经异或门后输出为一系列宽度不等的矩形波,如图 2-12 (c) 所示,显然该矩形波的宽度反映了发电机电压与系统电压间相位差的大小。借助定时计数器和 CPU 可读取矩形波的宽度 τ_i ,如图 2-12 (d) 所示,每工频周期计数器工作一次。

若定时计数器的计数脉冲频率为 f_c ,其计数值为 N ,则与相位差 δ_i 对应的脉冲 τ_i 为

$$\tau_i = \frac{N}{f_c} \quad (2-20)$$

已知系统电压的方波宽度为 τ_s ,它等于 1/2 工频周期(即 180°),因此 δ_i 可按下式求得:

$$\begin{cases} \delta_i = \frac{\tau_i}{\tau_s} & \tau_i \geq \tau_{i-1} \\ \delta_i = 2\pi - \frac{\tau_i}{\tau_s} \pi & \tau_i < \tau_{i-1} \end{cases} \quad (2-21)$$

根据式(2-21)求得 δ_i 后,便可得到 $\delta_e(t)$ 的变化轨迹,如图 2-13 所示,其中图 2-13 (a) 为 ω_d 恒定时 $\delta_e(t)$ 的变化轨迹,图 2-13 (b) 为 ω_d 等速变化时 $\delta_e(t)$ 的变化轨迹。如果在计算中,一个转差周期的 $\delta_e(t)$ 轨迹如图 2-13 (a) 中的直线 A 所示,它所对应的 ω_d 为常数,如图中直线 A' 所示,表明电网和待并发电机组的频率稳定。如果 $\delta_e(t)$ 的轨迹如图 2-13 (b) 中的



曲线 B 所示, 与它对应的 $\omega_d(t)$ 为图中直线 B' , 这说明发电机组按恒定加速度升速, 发电机频率与电网频率逐渐接近。

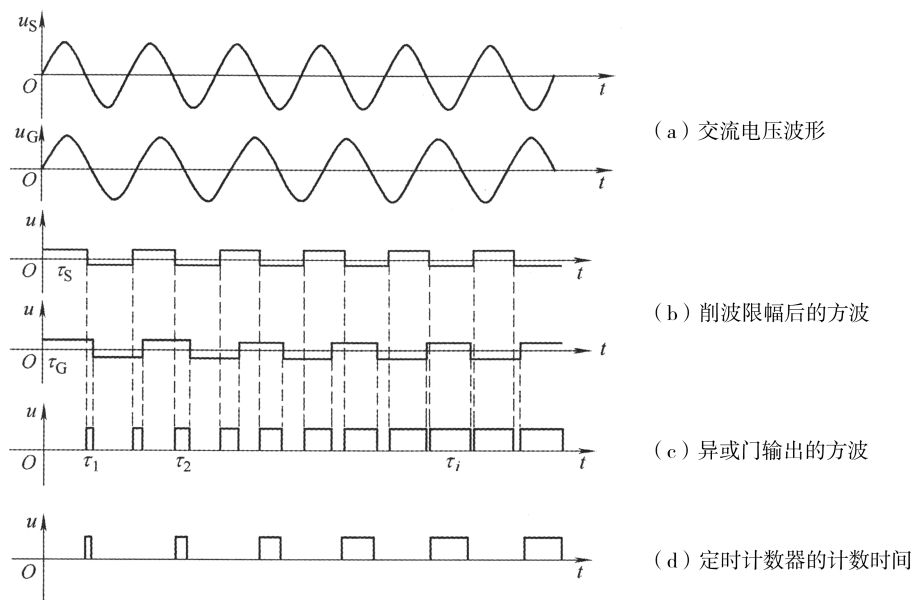


图 2-12 相位差 δ_e 测量波形分析

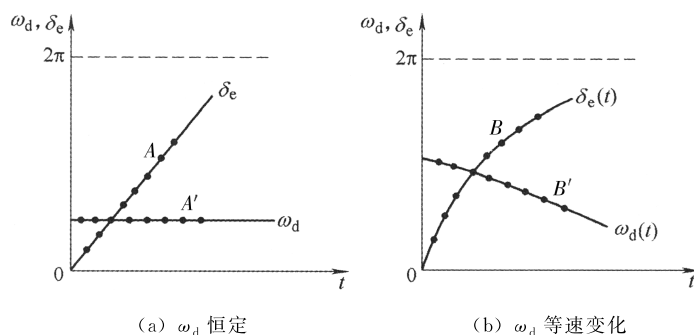


图 2-13 $\delta_e(t)$ 的变化轨迹

由式(2-21)计算得到当前相位差 δ_i 后, 便可求得转差角频率 ω_{di} 、相位差加速度 $\Delta\omega_{di}/\Delta t$ 以及与恒定越前时间对应的最佳越前相位差 δ_{YJ} 。

$$\omega_{di} = \frac{\delta_i - \delta_{i-1}}{2\tau_s} \quad (2-22)$$

$$\frac{\Delta\omega_{di}}{\Delta t} = \frac{\omega_{di} - \omega_{d(i-n)}}{2\tau_s n} \quad (2-23)$$

$$\delta_{YJ} = \omega_{di} t_{YJ} + \frac{1}{2} \times \frac{\Delta\omega_{di}}{\Delta t} t_{YJ}^2 \quad (2-24)$$

式中, ω_{di} ——当前计算点的转差角频率; δ_i, δ_{i-1} ——当前计算点和上一计算点的角度值; $2\tau_s$ ——两计算点间的时间; $\omega_{di}, \omega_{d(i-n)}$ ——当前计算点和前 n 个计算点的转差角频率。

由于两相邻计算点的转差角频率变化甚微, 因此, $\Delta\omega_{di}$ 可经若干计算点后才计算一次。式(1-24)中计及了 δ_e 含有加速度的情况, 使计算结果更加精确。



三、频率差的检测

频率差检测与电压差检测一样，都是在恒定越前时间之前要完成的检测任务，用以判别是否符合并列条件。在数字式准同期并列装置中，可用以下两种方式进行频率差的检测。

（一）利用相位差 $\delta_c(t)$ 的变化轨迹计算频率差

这种方法的计算过程如式(2-22)所示， ω_{di} 的值可以每工频周期(约 20 ms)计算一次。由 ω_{di} 在已知时段(Δt)间的变化可进一步求得 ω_{di} 的一阶导数 $\Delta\omega_{di}/\Delta t$ ，如式(2-23)所示。 ω_{di} 的一阶导数可表明待并发电机组的转速是否稳定，若其值过大，则说明发电机转速尚在升速或减速过程中，并网后进入同步运行的暂态过程就会较长甚至失步，因此在并列过程中也可作为条件之一加以限制。

（二）直接测量两并列电压的频率

频率差的测量也可通过图 2-14 所示电路直接测量得到，利用该电路首先测得两并列电压频率，然后计算得到频率差值以及发电机频率的信息。

图 2-14 所示的测量电路的基本原理是测量交流信号的周期。首先把交流正弦电压信号转换为方波，再经二分频电路后，其半波时间即为交流电压的周期 T ，然后利用正半周高电平作为可编程定时器/计数器开始计数的控制信号，其下降沿即停止计数并作为中断申请信号，由 CPU 读取其中计数值 N ，并使计数器复位，以便为下一个周期计数做好准备。

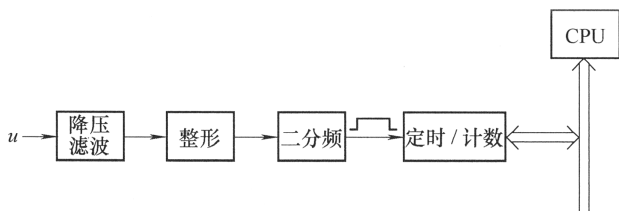


图 2-14 并列电压频率直接测量电路

若计数器的计数脉冲频率为 f_c ，则所测交流电压的周期为

$$T = \frac{N}{f_c}$$

于是求得交流电压的频率为

$$f = \frac{f_c}{N} \quad (2-25)$$



设 N_G 为发电机电压周期的计数值, N_S 为系统电压周期计数值, 则频率差为

$$f_d = f_G - f_S = f_c \left(\frac{1}{N_G} - \frac{1}{N_S} \right) \quad (2-26)$$

为了简化并列装置接线并且能与相位差测量电路合用, 在图 2-14 中也可省略二分频环节, 把交流电压正弦信号转换成方波后, 就去控制计数器, 这时的计数时间为半个工频周期 ($T/2$), 依此, 计算机也可方便地求出频率值、频率差大小等。

四、频率差的调整

频率差调整的任务是将待并发电机的频率调整到接近于系统频率, 使频率差接近于并列条件。若发电机的频率低于电网频率, 则发出升速脉冲信号, 升高发电机转速; 反之, 则发出减速脉冲信号, 降低发电机转速。发电机转速的调节按比例调节准则进行, 当频率差较大时, 发出的调节脉冲越宽; 当频率差较小时, 调节脉冲的宽度也就越窄。根据上述要求, 频率差的调整分为频率差方向测量和调速脉冲控制两个环节。

当自动准同期并列装置测量频率差由计算机软件实现时, 频率差方向的测量十分方便。根据式(2-26)可方便地测量出频率差的方向。设 Δf 为允许频率差, 则

$f_d \leq \Delta f$ 时, 不发调速脉冲;

$\begin{cases} f_d > \Delta f \\ f_G > f_S \end{cases}$ 时, 发出降速脉冲;

$\begin{cases} f_d > \Delta f \\ f_G < f_S \end{cases}$ 时, 发出升速脉冲。

图 2-15 为频率调节程序示意图。由图可知, 除了在频率差不满足要求的情况下对发电机频率进行调整外, 当频率差满足要求但数值太小(图中为 0.05 Hz)时, 为防止出现同频现象, 应发出增速脉冲。同期并列装置在并网时, 若发电机与系统频率相同或很相近时发出合闸脉冲, 而随后相位差又被拉大了, 则会造成较大冲击。因此, 同期装置在检测到并列点两侧电压同频时, 必须控制发电机调速器, 破坏当前的同频状态。一般应进行加速控制, 以免同时出现逆有功功率。

在频率差的调整过程中, 调速脉冲的宽度应与频率差成正比, 或根据发电机调速系统特性直接设置脉冲宽度, 调速周期可设定在一定范围内(如 2~5 s)或为一定值。另外, 并列过程中对发电机进行调频时, 不断测量发电机频率, 并与系统频率进行比较, 然后形成调速脉冲, 再通过调速器改变汽轮机进汽量(或水轮机进水量), 实现对发电机频率的调整。实际上, 整个调速系统是一个闭环负反馈自动调节系统, 被调量是发电机频率 f_G , 目标频率是系统频率 f_S 。

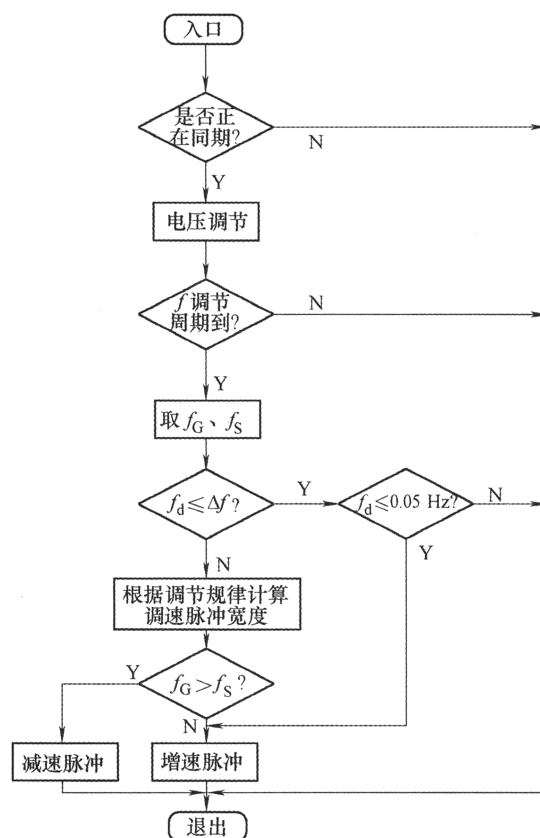


图 2-15 频率调节程序示意图

第四节 电压差的测量及调整

电压差检测的任务是在恒定越前时间之前作出电压差是否符合并列条件的判断，当电压差不满足要求时，发出升压脉冲或降压脉冲。

一、电压差的测量

在微型机自动准同期并列装置中，电压差检测的方案可分为两类：一是直接读入 U_G 和 U_S 的值，然后进行计算比较；二是先利用外部输入装置从两个电压互感器的二次侧提取电压差值和极性信号，然后由 CPU 读入。

（一）直接读入方式

直接读入方式就是将发电机电压 u_G 和系统电压 u_S 采样后读入主机，然后计算两电压间



的差值,判断其是否低于允许电压差值,并可判别待并发电机电压高于或低于电网电压。

利用逐次逼近型 A/D 转换器构成的电压采样电路如图 2-16 所示,主要包括电压形成电路、模拟低通滤波电路、采样保持电路、多路转换开关及 A/D 转换器五个部分。

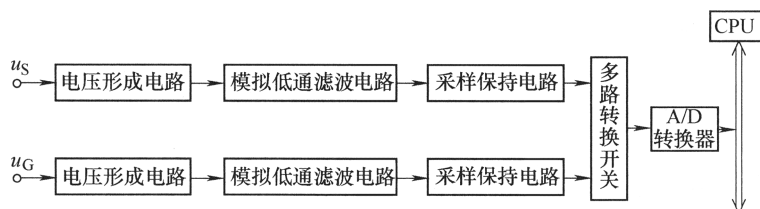


图 2-16 逐次逼近式电压模拟量输入电路结构框图

1. 电压形成电路及模拟低通滤波器

电压形成电路作用主要有两方面:一是将电压互感器的二次电压进一步降低,以适应 A/D 转换器输入范围的要求,一般 A/D 转换器要求输入电压为 $\pm 5\text{ V}$ 或 $\pm 10\text{ V}$;二是将电压互感器的二次回路与 A/D 转换器完全隔离,提高装置的抗干扰能力。

低通滤波器的作用是限制输入信号的频率,在采样前将 $f_s/2$ (f_s 为采样电路的采样频率)以上的频率分量滤去,以保持所需频率信号的采样不失真。图 2-17 为电压变换和 RC 低通滤波电路,模拟低通滤波器的幅频特性的最大截止频率根据采样频率的取值来确定。例如,当采样频率为 1000 Hz 时,即每工频周期采样 20 个点,则要求低通滤波器必须滤除输入信号中大于 500 Hz 的高频分量。稳压管 VS_1 和 VS_2 组成双向限幅器,使后面环节的输入电压在要求范围内。

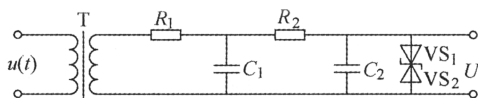


图 2-17 模拟量输入电压变换及低通滤波电路

2. 采样保持电路

A/D 转换器完成一路信号的转换需要一定的时间,在此期间输入端的模拟电压信号应保持不变,这一任务可由采样保持器来完成。

采样保持器的基本电路如图 2-18 所示,它由模拟开关、保持电容器和缓冲放大器组成。采样期间,在控制信号为高电平时模拟电子开关 S 闭合,输入信号 u_{in} 经高增益放大器 A_1 后的输出通道通过模拟开关向电容器快速充电,使电容器电压迅速达到输入电压值。

保持期间,使控制信号为低电平,模拟开关 S 断开,由于运算放大器 A_2 输入阻抗很大,理想情况下电容器将保持充电时的最终值,即在电容器 C 上保持采样信号。 A_2 输出 u_{out} 到 A/D 转换器。若要使电容器上电压保持时间长,则需要电容足够大以及 A_2 的输入阻抗足够高。