

摘要

随着我国电力工业技术的快速发展，电网规模不断扩大，电网结构日趋复杂，系统容量也在日益增长。而作为对电力系统一次主设备进行控制、测量、监控、保护的二次设备组成的系统即电力系统变电站二次系统则越来越向着微机化、信息化的方向发展。而整个二次系统目前已经形成比较典型的综合自动化系统。

此外，目前我国变电站中越来越多的保护和控制设备采用就地布置的方式，由于高压设备的操作、短路或雷击故障、低压交直流回路内电气设备的操作、电气设备周围的静电场和磁场、电晕和电磁波幅射等引起的电磁干扰则越来越严重。为此，变电所电磁兼容设计是一个重要的问题，这一问题越来越受到人们的重视。

本文通过分析目前变电站系统中产生的各种干扰源及其传播途径，以及其对微机保护系统的各种影响，提出了对整个二次回路以及微机保护装置所采取的抗干扰措施和工程实践应用。

关键词：微机保护 抗干扰 屏蔽 接地

Abstract

As China's power industry's rapid technological development, expanding the scale of power grids, power grid structure of the growing complexity of system capacity is also growing. As one of the main power system control equipment, measurement, monitoring and protection equipment, the second component of the system that is the power auxiliary system is more and more toward computer and information technology direction. Second, the entire system has been compared with the typical form of integrated automation system.

In addition, China's substation in a growing number of protection and control equipment used on the spot layout of the way, as the high-voltage equipment, lightning or short-circuit failure, low-voltage AC-DC circuit in electrical equipment, electrical equipment around the electrostatic field and magnetic field , The corona and electromagnetic radiation, such as caused by electromagnetic interference is becoming more and more serious. To that end, EMC substation design is an important issue, the issue is receiving increasing attention.

Through analysis of the current system of substations in the various sources of interference and its route of transmission, as well as its computer systems to protect the various effects on the secondary circuit as a whole, as well as the protection of computer equipment taken by the anti-jamming measures and the application of engineering practice .

Keywords: Relay Protection , Anti-jamming, Shielding, Grounding

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 浙江大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名： 签字日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 浙江大学 有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权 浙江大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名： 导师签名：

签字日期： 年 月 日 签字日期： 年 月 日

学位论文作者毕业后去向：

工作单位： 电话：

通讯地址： 邮编：

第 1 章 绪论

1.1 电力系统中抗干扰研究的意义

随着我国电力工业技术的快速发展,电网规模不断扩大,电网结构日趋复杂,系统容量也在日益增长。电力系统一次主设备(变压器、断路器、隔离开关等直接用于传输电能的设备)随着技术水平、制造工艺的发展,其可靠性及安全性较以前有了明显的提高。而作为对电力系统一次主设备进行控制、测量、监控、保护的二次设备组成的系统即电力系统变电站二次系统则越来越向着微机化、信息化的方向发展。二次系统装置特别是保护系统装置先后经历了电磁型、感应型、电子管型、晶体管型、集成型和目前广泛应用的微机型。而整个二次系统目前已经形成比较典型的综合自动化系统。

变电站综合自动化系统是利用先进的计算机技术、现代电子技术、通信技术和信息处理技术等实现对变电站二次设备(包括继电保护、控制、测量、信号、故障录波、自动装置及远动装置等)的功能进行重新组合、优化设计,对变电站全部设备的运行情况执行监视、测量、控制和协调的一种综合性的自动化系统。通过变电站综合自动化系统内各设备间相互交换信息,数据共享,完成变电站运行监视和控制任务。变电站综合自动化替代了变电站常规二次设备,简化了变电站二次接线。变电站综合自动化是提高变电站安全稳定运行水平、降低运行维护成本、提高经济效益、向用户提供高质量电能的一项重要技术措施。

另一方面,对电力系统本身而言,正常运行时,其生产和传输电能的方式就是靠电磁转换。换言之,电力系统就是一个巨大的电磁网,电力系统一、二次设备就是在这个环境下工作,从而这一电磁网不可避免地会对电力设备特别是二次设备产生电磁干扰。这一情况在早期的变电站系统中,由于其采用的元件都以机械式为主,对各种电磁干扰(所谓电磁干扰是指任何可能引起装置、设备或系统性能的降低或者对生物或非生物产生不良影响的电磁现象)的敏感度较低,影响也不明显。随着计算机及微电子技术在电力系统的广泛运用,由于这些设备本身耐受电磁干扰的能力较弱,从而使得由其组成的二次系统更容易受电力系统这一

大的电磁网的影响。此外,目前我国变电站中越来越多的保护和控制设备采用就地布置的方式,由于高压设备的操作、短路或雷击故障、低压交直流回路内电气设备的操作、电气设备周围的静电场和磁场、电晕和电磁波幅射等引起的电磁干扰则越来越严重。为此,变电所电磁兼容设计是一个重要的问题,这一问题越来越受到人们的重视。

为了做好变电站二次系统的抗干扰工作,有必要对各种干扰源进行分析,找出其内在规律,从而有针对性地进行防护。

1.2 国外电磁兼容方面的研究历史

电磁兼容性(英文 Electromagnetic Compatibility,简称 EMC),这一新的课题随着电力系统的发展也应运而生。按照国际电工委员会(IEC)的定义,电磁兼容性是指设备或系统在其电磁环境中能正常工作且不对该环境中的任何事物构成不能承受的电磁干扰能力。根据这个定义可知 EMC 的主要研究对象是电磁干扰,即干扰源的形成及其性质,干扰的耦合各传输,敏感设备的响应特性和抗干扰措施等。换句话说,电磁兼容是研究在有限的空间、有限的时间、有限的频谱资源条件下,各种用电设备可以共存并不致引起降级的科学。

对于电磁干扰的研究可以追溯到 19 世纪。最早出现的电磁干扰现象是单线电极之间的串扰。希维赛德于 1881 年写了一篇“论干扰”的文章,被认为是最重要的早期文献。但这类干扰现象并未引起干扰者和被干扰者的重视,随着电气运输的出现,在一根通信线与一根不对称的强电线有较长的平行运行,干扰问题日益严重,这样在 1887 年柏林电气协会就成立了全国干扰问题委员会。20 世纪 20 年代以后,各个工业先进的国家日益重视电磁兼容问题的研究,于是相应的国际组织纷纷产生。20 世纪初索末菲在这方面进行了卓越的研究。以后人们对电磁感应影响的研究日益深入,其中波拉切克、卡尔森、哈波兰德、尚德、克留威、柯列、韦特、拉如莫夫等的工作都很突出。直到目前,此类干扰问题仍为国际电信联盟(ITU)第五研究组及第六研究组在各研究期的主要研究课题。

除了感性、容性及阻性等耦合方式引起的干扰外,人们还对辐射性干扰进行了大量的研究。虽然在早期这些工作进行的比较零散,但以后逐步走向正轨,各国陆续建立起相关的机构。目前国际上除了 EMC 专业学会外,还有国际无线电干扰特别委员会(CISPR)等组织从事与 EMC 有关的高频干扰课题研究。

美国至 1945 年开始，颁布了一系列电磁兼容方面的军用标准和设计规范，并不断加以充实和完善，使得电磁兼容技术进入新的阶段。60 年代以来，现代科学技术向高频、高速、高灵敏度、高安全密度、高集成度、高可靠性方向发展，其应用范围越来越广，渗透到了社会的各个角落，正由于大规模集成电路的出现把人类带入信息时代，近年来信息高速公路和高速计算机技术的不断应用，也使得电磁兼容方面的要求也越来越突出。

1.3 国内电磁兼容方面研究的历史

我国在电磁兼容方面的研究相对较晚，但随着生产和科研的发展，EMC 的研究也日益受到重视，并得到迅速发展。国家有关部门，如国家科委、国防科工委、国家无线电管理委员会、国家技术监督局、国家安全局，公安部等等都加速了 EMC 的研究步伐，纷纷成立了与 EMC 有关的学术组织。1984 年，首先由中国通信学会、中国电子学会、中国电机工程学会、中国铁道学会在重庆联合召开了第一届全国环境电磁学学术会议，交流论文 49 篇，内容涉及工频、音频、射频、视频、核电磁脉冲及雷电等。

电力系统中，在电网容量增大、输电电压增高的同时，以计算机和微处理器为基础的继电保护、电网控制、通信设备得到广泛采用。因此，电力系统电磁兼容问题也变得十分突出。例如，集继电保护、通信、SCADA 功能于一体的变电站综合自动化设备，通常安装在变电站高压设备的附近，该设备能正常工作的先决条件就是它能够承受变电站中在正常操作或事故情况下产生的极强的电磁干扰。此外，由于现代的高压开关常常与电子控制和保护设备集成于一体，因此，对这种强电与弱电设备组合的设备不仅需要进行高电压、大电流的试验，同时还要通过电磁兼容的试验。GIS 的隔离开关操作时，可以产生频率高达数兆赫的快速暂态电压。这种快速暂态过电压不仅会危及变压器等设备的绝缘，而且会通过接地网向外传播，干扰变电站继电保护、控制设备的正常工作。随着电力系统自动化水平的提高，电磁兼容技术的重要性日益显现出来。

1.4 电磁兼容技术的主要内容和发展趋势

电力系统电磁兼容的主要内容包括：

- 电磁环境评价。即通过实测或数字仿真等手段，对设备在运行时可能受到的

电磁干扰水平(幅值、频率、波形等)进行估计。例如,利用可移动的电磁兼容测试车对高压输电线路或变电站产生的各种干扰进行实测,或通过电磁暂态计算程序对可能产生的瞬变电磁场进行数字仿真。电磁环境评价是电磁兼容技术的重要组成部分,是抗干扰设计的基础。

- 电磁干扰耦合路径。弄清干扰源产生的电磁骚扰通过何种路径到达被干扰的对象。一般来说,干扰可分为传导型干扰和辐射型干扰 2 大类。传导干扰是指电磁骚扰通过电源线路,接地线和信号线传播到达对象所造成的干扰,例如,通过电源线传入的雷电冲击源产生的干扰;辐射干扰是指通过电磁源空间传播到达敏感设备的干扰。例如,输电线路电晕产生的无线电干扰或电视干扰即属于辐射型的干扰。研究干扰的耦合途径,对制定抗干扰的措施,消除或抑制干扰有重要的意义。
- 电磁抗扰性评价。研究电力系统中各种敏感的设备仪表,如继电保护、自动装置、计算机系统、电能计量仪表等耐受电磁干扰的能力。一般是采用试验来模拟运行中可能出现的干扰并在设备尽可能接近工作条件下,试验被试设备是否会产生误动或永久性损坏。设备的抗扰性决定于该设备的工作原理,电子线路布置、工作信号电平,以及所采取的抗干扰措施。随着电力系统中各种自动化系统和通信系统的广泛采用,随着强电设备与弱电设备集成为一体的趋向,如何评价这些设备耐受干扰的能力、研究实用和有效的试验方法,制定评价标准将成为电力系统电磁兼容技术的重要课题。
- 抗干扰措施,电磁干扰的产生和耦合。敏感设备是不可能完全避免电磁骚扰的。因此,往往比较经济合理的解决办法是在敏感设备上应用抗干扰措施。例如,电力调度大楼遭受雷击是不可避免的。但通往系统和调度自动化系统的安全运行可通过正确的接地、屏蔽、隔离措施加以保证。研究有效经济和适用的抗干扰措施也是未来电磁兼容领域的重要任务。
- 电能质量。国际大电网会议 36 学术委员会(电力系统电磁兼容)把电能质量控制也列入电磁兼容的范畴,研究频率变化、谐波、电压闪变、电压骤降等对用户设备性能的影响。

第 2 章 电力系统的主要干扰源及其传播途径

电力系统经常遇到雷电侵扰，还不时发生短路等各类故障，为了满足系统运行方式及设备检修的需要，经常还会对一次高压设备（断路器、隔离开关等）进行各种操作，此时都会产生暂态干扰电压，通过静电耦合、电磁耦合或直接传导等途径进入继电保护继电保护装置，其峰值高达几百V至几千V，甚至数十kV，频率则在几百kHz至几千kHz，甚至高达几MHz。这些电磁信号称为电磁干扰信号，常常对我们变电站的控制系统及继电保护装置产生不可忽视的影响，特别是大量采用电子元器件及计算机监控及保护系统的今天，这种影响尤其不能忽视，如果不采取有效措施防御，容易造成继电保护及安全自动装置的误动或拒动，造成监控系统的数据混乱及死机等现象，严重时甚至会损坏二次回路的绝缘及保护装置中的电子元器件，对电网的安全构成严重威胁。

2.1 各种主要干扰源

同一电力系统中的各种电气设备，由于运行方式的改变、故障、开关操作等引起的电磁振荡会波及很多电气设备，使其工作发到性能受到影响甚至遭到破坏。电力系统电磁干扰主要表现在一次与一次设备之间、一次和二次设备之间、二次和二次设备之间，包括工频、谐波、冲击和高频振荡。

变电站和发电厂本身是一个强大的电磁干扰源，在正常和故障情况下都会产生各种电磁干扰。干扰源大致可分为以下几类：

- 电磁耦合干扰：电力系统一次设备和二次之间几乎都是通过电磁耦合进行工作的，同时，电场效应和磁场效应也无处不在，因此，一次设备本身的高压电场可通过电容藕合到二次设备；大电流产生的磁场也可通过电感耦合到二次设备。
- 射频干扰：由于天线效应，大型变压器、大型发电机和电动机、高压导线等都会发射出工频和谐波频率的电磁辐射。
- 雷电干扰：雷电流平均20kA，最高可达200kA，其发生时间处于此级，雷电流对二次的影响主要是在二次电缆上的干扰。雷电流经避雷器入地，使得地网上的电位分布极不均匀，另外引起地电位升高，将对屏蔽层接

地的电缆上产生干扰。

- 操作引起的干扰: 次系统中的开关操作, 断路器、隔离开关的操作会引起电气回路状态变化, 特别是隔离开关动作时, 没有灭弧装置, 产生多次电弧重燃引起的电磁能量振荡。一般认为开关操作是引起干扰和过电压的重要原因。
- 短路电流: 短路产生的大电流通过耦合对二次设备造成干扰, 且短路入地电流会引起地电位升高, 形成地电位差。
- 二次回路操作干扰: 如继电器回路, 当断开直流回路电感线圈时会产生高频过电压, 每次开关触点都要在回路中产生一次波过程, 一连串的暂态过程直接影响着同一电源下的回路, 同时通过电磁耦合到其它回路。
- 局部放电: 高压导线表面及绝缘子金具尖端部位的电晕放电, 接触不良产生的火花放电以及污秽绝缘子表面的局部火花等都会产生电磁辐射, 形成辐射干扰源。
- 对讲机和通信设备: 通信设备、高频载波机、对讲机都会产生不可忽视的辐射干扰。
- 装置内部电子干扰: 如电子设备的电子线路产生各种杂音干扰等。

由上分析可见, 在电力系统中的电磁干扰形成的原因和类型复杂, 不仅强度大, 而且频谱范围极宽, 可以从几十到数百MHz, 这给电磁防护造成很大困难。

2.2 各种主要的耦合方式

2.2.1 静电耦合

一次的强电通过静电耦合到二次回路的干扰电压, 实质上是经由耦合电容加到二次回路的, 如图 2-1 所示为静电耦合产生干扰的简化电路。其对地阻抗 Z_2 包括电气连接的二次回路对地总阻抗, 耦合阻抗 Z_1 包括设备的一、二次绕组间以及一次母线和二次电缆之间的耦合阻抗。如一次干扰源的干扰电压为 U_s , 则二次回路产生的干扰电压 U_r 可由下式表达

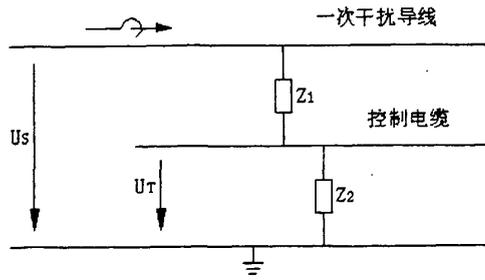


图 2-1 静电和产生干扰的简化电路图

$$U_r = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} U_s \quad (2-1)$$

在不对称的二次回路中，静电耦合的等效电路如图 2-1 所示，因二次回路的对地绝缘阻抗远大于负载阻抗，故二次回路对地阻抗近似等于负载阻抗，在这种情况下干扰电压能在二次回路的负载上产生一个附加的电压，此电压大到一定程度会引起二次设备的不正确动作。这种干扰类似于加到电流、电压互感器二次回路的干扰电压。

在对称的二次回路中，静电耦合的等效电路如图 2-2 所示，其二次回路对地的阻抗为二次设备和控制电缆的对地电容。因为在一般情况下二根电缆芯和设备的二次绕组对地分布电容是相等的，所以，在对称电路的两部分上产生相等的干扰电压，而加在负载上的干扰电压 U_L 接近为零，但当干扰电压达到一定幅值时会造成二次设备或电缆芯的绝缘击穿。这种干扰类似于加到直流控制母线上的干扰电压。

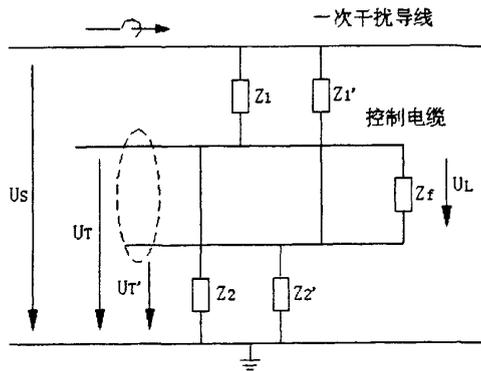


图 2-2 对称二次回路的静电耦合

2.2.2 电磁感应

电磁感应产生的干扰电压，是由一次回路和二次回路之间、二次回路的强电与弱电之间、交流与直流之间存在互感而引起的。干扰电压的大小与各回路之间的互感阻抗、干扰源的电流的大小、电流的频率以及各回路的相对位置有关。现用图 2-3 对回路间电磁感应的大小作一分析。

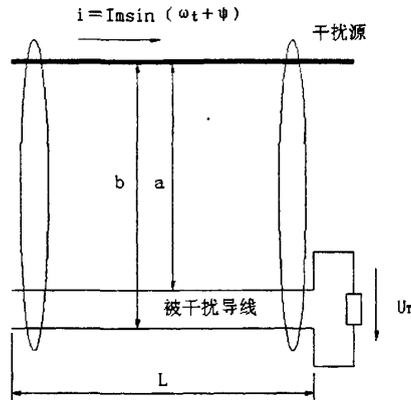


图 2-3 平行导线间的电磁干扰

图中干扰源与被干扰导线平行(其 φ 等于 0), 当干扰源流过一个电流 $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ 时, 两者之间的互感可以下式计算:

$$M = \frac{\mu_0 L}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \cos\varphi \quad (2-2)$$

式中: μ_0 ——空气的导磁系数;

L ——平行的电缆芯长度;

a 、 b ——两根导线分别与干扰源的距离;

φ ——干扰源与导线间的夹角。

此时负载上产生的干扰电压可按下式计算:

$$U_r = M \frac{di}{dt} = \frac{\mu_0 L I_m \omega}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \sin(\omega t + \varphi) \cdot \cos\varphi \quad (2-3)$$

从式 (2-3) 可以看出, 干扰源通过电磁干扰加到负载上的干扰电压大小, 与导线的长度及通过的干扰源电流成正比, 与干扰源的频率成正比, 还与两者之间的平行度有关, 当两者平行时, 干扰电压最大, 当两根导线与干扰源的距离相

等时，干扰电压最小，反之则增大。通过分析(2-3)式，我们可以理解影响电磁干扰电压大小的因素，寻找出降低电磁干扰的办法。

2.2.3 地电位差

在变电所中，为了减少地电位差对电气设备及人员造成的安全威胁，建设了相对完善的地电网，但由于接地体本身存在一定的电阻与电感，要做到完全等电位是不可能的。当大电流接地系统发生单相或两相接地短路时，变电所的接地网中会流过很大的故障电流，此电流流经接地体的阻抗时便会产生电压降，使得变电所内各点的地电位有较大的差别。当同一回路连接到变电所的不同区域并且有多点接地时，各接地点间地电位差就会在连接的电缆芯中产生电流。例如，在主变差动回路中，如果各侧电流互感器二次回路的中性点各自单独在端子箱中接地，而各侧电流回路又在保护屏处有电气连接，如图2-4所示，这时在有地电位差时将在差动回路中流过电流，影响差动保护动作准确性。

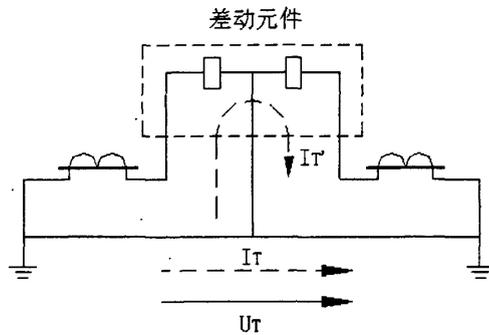


图 2-4 地电位差在两点接地回路中引起的干扰

在变电所中，曾经在故障时测量到地电位差达 3 万多伏的情况，当时这一干扰电压使全所的计算机监控系统失灵，由此可见电位差造成的干扰是不能忽视的。这一电位差将形成很大的地网电流，当这一电流通过电缆线或外皮时，可能会将其烧断。

2.3 由开关操作引起的干扰

一次回路中，当开关进行切合操作时，引起回路的状态发生变化，从一种稳定状态经过振荡达到新的稳定状态，从而产生暂态过电压。图 2-5 所示的简化等

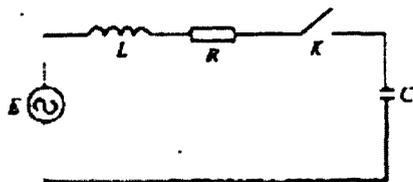


图 2-5 切合开关产生暂态过电压的简化等值电路

值电路，当闭合开关 K 时的振荡频率为：

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (2-4)$$

如果回路参数 L 和 C 的数值都比较小，如切合小电容负载等，则产生频率很高的振荡。试验结果表明，用隔离开关切合空载母线时，开关触头间将产生电弧重燃，在回路中形成一系列高频振荡。分闸操作时，振荡幅值随着重燃次数的增加而增大，合闸操作时则相反，振幅随着电弧重燃次数的增加而降低。

下面以隔离开关切合空载母线为例，分析电弧的重燃过程。

合闸时，动触头以一定的速度向静触头移动，断口逐渐缩小。当断口间的电位差足以使其间的空气绝缘击穿时，就产生了第一次电弧。空载母线上的电位从初始状态的零值经过短暂的振荡过程后变为当时电源电压的瞬时值。如果忽略工频电流，则当高频电流为零时，电弧熄灭，母线再次和电源断开。此时若忽略母线上的电荷泄漏，母线上的电位一直保持熄弧时的数值。随后，电源电压继续按正弦规律变化，断口两端的电位差又逐渐增大，直到断口气隙又被击穿为止，母线电位再经过振荡以后改变为此时电源电压的瞬时值，电弧随即又熄灭。这样，电弧的重燃和熄灭过程反复出现，直至动触头和静触头相互接触为止。因为在合闸过程中，断口间隙逐渐缩小，则电弧重燃时断口两端电位差也逐渐缩小，故在工频一个周期内电弧重燃次数逐渐增加，母线电压成为越来越密的阶梯状波形。

同理，分闸时，当触头分离后，第一次工频电流过零，母线的充电电流即被切断，电弧熄灭。在空载母线上保持断开瞬间的电位，此后随着电源电压变化，断口两端的电位差增加，直到间隙被击穿，发生第一次电弧重燃，经过短暂的高频振荡以后，当母线电压重新等于电源电压时，电弧再次熄灭。这个过程也是重复进行的，直到断口距离足够大，断口之间的气隙的介质恢复强度超过两电源电压幅值时为止，电弧不再重燃。分闸时，随着断口之间的距离逐渐增大，每次电

弧重燃时断口两端的电位差也阶跃式增加，不过，和合闸情况相反，在一个工频周期内的重燃次数逐渐减少。

电弧每次重燃都引起一次高频振荡，振荡的幅值等于电弧重燃以前断口之间的电位差，即母线上电压的突变值。显然，合闸情况下的最大幅值等于电源相电压的幅值，出现在第一次电弧发生时，即

$$U_1 = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \sqrt{2} \quad (2-5)$$

式中， U_1 为合闸时第一次电弧引起高频振荡的电压幅值， U_N 为变电所电网的运行线电压。分闸情况下，高频振荡的最大电压幅值发生在最后一次电弧重燃的时刻，此时，考虑母线上的电荷泄漏，其最大电压幅值为：

$$U_1 = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \sqrt{2} \left(1 + e^{-\frac{1}{2T}} \right) \quad (2-6)$$

式中， U_2 为分闸时最后一次电弧重燃引起高频振荡的电压幅值， F 为电源频率， T 为母线上电荷泄漏的时间常数，由母线对地电容和母线泄漏电阻决定。

用隔离开头操作时，电弧重燃过程的总时间随着隔离开头的结构不同而异。通常三支柱转臂式双断口的隔离开关的重燃时间比单断口双支柱式的隔离开关要短，故操作时对二次回路的干扰时间也短一些。

一般来讲，由于断路器的断口之间有灭弧介质，而动触头的运动速度比隔离开头快，所以操作时的电弧重燃概率很小，所产生的干扰较之隔离开关操作时也低得多，当断口间有抑制操作过电压的并联电阻时，对二次回路的干扰就更小。

图 2-6 分别为隔离开关单相合闸和分闸时二次回路中暂态电压的幅值和重复率与动触头运动时间的关系曲线。由图可见，在分闸时，二次回路中暂态电压的幅值随动触头运动时间的增大而增大；在合闸时则相反。暂态电压出现的重复率，合闸时逐渐增大，分闸时逐渐减小。但在分闸过程刚开始和合闸过程即将结束的一段时间内，重复率随动触头运动时间的变化关系出现相反的规律。这主要是由于在这段时间内断口距离很小，间隙的介质恢复速度较慢，同时因为重燃电压低，高频电流小，电弧电流中的工频分量起主要作用，电弧只有在工频电流过零时才能熄灭，故重燃次数反而减小。

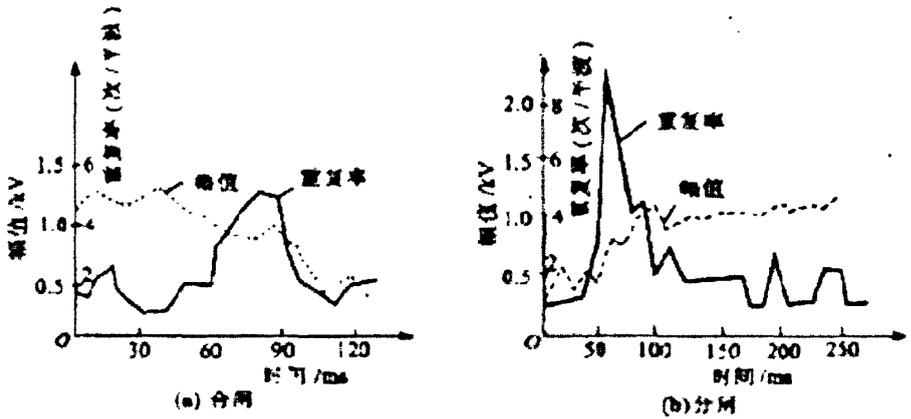


图 2-6 隔离开关单相操作时二次回路中暂态电压的幅值和重复率

由于开关操作的母线上接有其他电气设备，构成了复杂的振荡网络，这就决定了暂态振荡电压的波形为包含多种频率分量的衰减振荡波。现场实测的结果也证明了这一点。图 2-7 提供了 3 种不同的暂态电压波形。

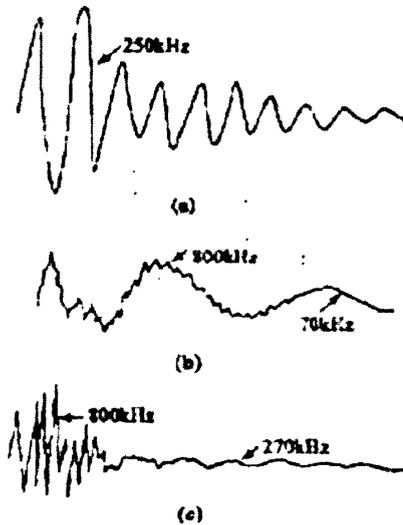


图 2-7 三种不同暂态电压的实测值

根据实测结果，这种干扰波形的频率一般从 200kHz 到约 1MHz，每串干扰波的持续时间为 20~50 μ s，高频振荡波的幅值多半在 2.5~3 个周波内就衰减到初始值的 1/2 左右。每串干扰波的能量一般从几毫焦到数十毫焦。单相操作时，在一个工频周期内，干扰波的出现次数大约从 1~20 次，平均每秒超过 156 次。二次回路中反复出现这亲的高频干扰，其累积作用是不容忽视的，特别是有记忆单元或积分单元的电路对此甚为敏感。晶体管保护及微机保护在其作用下会误动作，而在幅值很高时还会发生绝缘击穿事故。

2.4 阻性耦合产生的干扰

变电所中电玩雷击、系统对地短路等原因引起的地电位升高，对变电所设备会造成很大威胁，也是对二次回路干扰的主要来源之一。近年来，一些变电所的接地装置年久失修或维修不当，接地网严重腐蚀、引下线断裂，以致事故频频发生。不少设备包括二次设备、通信设备和电缆等大量损坏，使变电所的正常运行受到很大威胁。

当雷击直接击中变电所或发生单相接地短路时，大电流经接地点（包括雷击接地点、变压器的中性点接地点）泄入地网，使接地点乃至整个地网的电位升高，这时，接地点的电位可由下式决定：

$$U_g = I_g \cdot R_g \tag{2-7}$$

式中， I_g 为流经接地点的电流， R_g 为接地电阻。

例如，某变电所接地电阻为 0.257Ω ，单相短路电流为 8.674kA ，则接地点地电位升高为 $U_g=2.3\text{kV}$ 。如果二次回路和接地网的连接点，如二次电缆外皮、互感器二次绕组的中性点等靠近大电流的入地点，则这些连接点的电位也随之升高，在二次回路中造成共模干扰过电压。当过电压数值过大时，会引起二次设备绝缘击穿。二次电缆外皮在电缆两端与地网相连。由于两端的接地点电位不相等，将有电流流过二次电缆外皮，通过电磁耦合在二次电缆芯线上感应纵向电势，叠加在信号上造成干扰。当大量电流流过二次电缆外皮时，还会烧坏或烧断二次电缆。

2.4.1 二次电缆外皮中电流的计算

设变电所接地网由主接地网和主控制室接地网两部分组成，中间用联络地线相连，如图 2-8 所示。计算在二次电缆一端的外皮接地点 A 处发生单相接地短路时流过二次电缆外皮的电流。

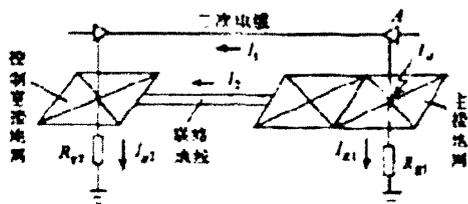


图 2-8 单相接地短路时接地网电流分布示意图

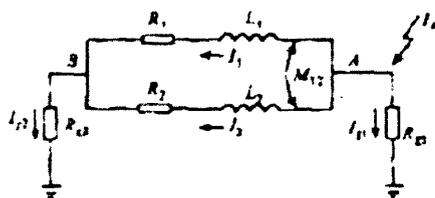


图 2-9 计算二次电缆外皮电流的等值电路

$$\text{显然} \quad \dot{I}_d = \dot{I}_{g1} + \dot{I}_{g2} \quad (2-8)$$

$$\dot{I}_{g2} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \quad (2-9)$$

图 2-9 为计算二次电缆外皮电流的等值电路，得：

$$\dot{I}_{g2} = \frac{R_{g1}}{Z_{AB} + R_{g1} + R_{g2}} \dot{I}_d \quad (2-10)$$

由联立方程式

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1(R_1 + j\omega L_1) + j\omega M_{12} \dot{I}_2 &= \dot{I}_2(R_2 + j\omega L_2) + j\omega M_{12} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_{g2} &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (2-11)$$

$$\dot{I}_{g2} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$$

可以解出流过二次电缆外皮的电流为（当联络地线和二次电缆距离很近，并耦合紧密时，可简化为）：

$$Z_{AB} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + j\omega L \quad (2-12)$$

$$\dot{I}_1 = \frac{R_{g1}}{(R_{g1} + R_{g2} + R) + j\omega L} \cdot \frac{R}{R_1} \dot{I}_d \quad (2-13)$$

$$\text{式中, } R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (2-14)$$

当联络地线和二次电缆距离较远，且耦合很弱时，则

$$Z_{AB} = \frac{(R_1 + j\omega L)(R_2 + j\omega L)}{(R_1 + R_2) + 2j\omega L} \quad (2-15)$$

设 $R_1 = R_2 = R$ ，则

$$Z_{AB} = \frac{1}{2}(R + j\omega L) \quad (2-16)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{R + j\omega L}{2R + 2j\omega L} \cdot \frac{R_{g1}}{\frac{1}{2}(R + j\omega L) + (R_{g1} + R_{g2})} \dot{I}_d \\ &= \frac{R_{g1}}{(R + j\omega L) + 2(R_{g1} + R_{g2})} \dot{I}_d \end{aligned} \quad (2-17)$$

比较上述两式，可以得出结论：在其他条件相同的情况下，耦合紧密比耦合不紧密的二次电缆外皮电流稍小。所以，将二次电缆沿电缆走向尽量靠近联络地线，对减小二次电缆外皮的电流较为有利。

2.4.2 二次电缆外皮电流产生的干扰

图 2-10 为研究二次电缆外皮电流产生的干扰模型图，

$$\left. \begin{aligned} u_B &= u_o - i_c l (r_o + p L_o) \\ u_A &= u_c - p M_o i_c \end{aligned} \right\} \quad (2-18)$$

则干扰电压 U_{AB} 为：

$$u_{AB} = u_A - u_B = [r_o + p(L_o + M_o)] i_c l = Z_o(p) i_c l \quad (2-19)$$

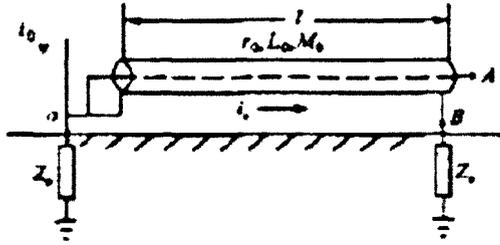


图 2-10 研究二次电缆外皮电流产生的干扰模型图

式中， $Z_o(p)$ 称为转移阻抗。因为屏蔽电缆外皮的自感和外皮与芯线间的互感相等，所以转移阻抗又可以写成：

$$Z_o(p) = r_o \quad (2-20)$$

上式表明，如果忽略二次电缆两端连接线的影晌，则由电缆外皮电流产生的干扰电压与流过外皮的电流和外皮电阻有关，而与电缆截面尺寸无关。采用高电导率的金属材料作为二次电缆的外皮可以有效地抑制这种干扰。

2.5 直流回路操作产生的暂态干扰

断路器的分合闸线圈、电磁式继电器的工作线圈等直流操作回路中常具有圈套的电感。当直流回路断开时，由于电感内储存的磁能释放，线圈两端可能产生几千伏的过电压。这种过电压可以直接或间接地影响由直流电源供电的二次设备，如微机保护装置等。图为中间继电器和断路器跳闸线圈断开时线圈两端的过电压波形。波形的前面部分为锯齿形，后面部分则为衰减振荡。锯齿波形成的原因是因为线圈电路断开时，线圈中的磁能向分布电容 C 充电，当分布电容上的电压（即开关断口上的电压）上升到足以使断口击穿时，断口间产生电弧。分布电容通过电弧放电，断口两端的电压下降，由于放电回路的时间常数非常小，断口电压迅速下降至 0，断口的绝缘恢复，分布电容又一次被充电，这个过程反复进

行下去，电弧多次重燃。每次电弧重燃，分布电容即完成一次放电过程，形成一个锯齿波。由于每次放电要消耗一部分磁能，同时随着开关断口距离拉长，绝缘强度恢复速度加快，所以断口距离达到某一限度后，电弧不再重燃。此后，线圈中剩余的能量和分布电容中的电场能量互相交换形成衰减振荡的波形，一直持续到能量全部耗尽为止。

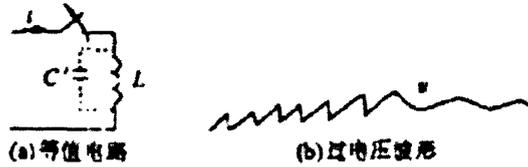


图 2-11 直流线圈电路断开时的等值电路和过电压波形

电感线圈断开的速度对暂态过电压的幅值和重复率有很大影响。断开速度加快，幅值增高，重复率降低。反之，当断开速度较慢时，过电压幅值降低，重复率增高。

表 2-1 隔离开关断开一个 220V DZ-17 型电磁继电器线圈时的暂态电压实测结果

		线圈两端电压	电源“+”“-”极间电压	电源“-”极对地电压
幅值/V	最大	2000（快拉）	120	40
	最小	700（慢拉）	---	30
重复率/ (千次*S ⁻¹)	最大	200~300（慢拉）	3000	3000
	最小	60~90（快拉）	---	---
持续时间/mS		6~7（快拉）	---	---

直流回路电感元件操作所产生的暂态过电压通过线间耦合和传导将在其他二次回路中激发起频率更高（几兆赫）的干扰电压。

在电磁式中间继电器线圈两端并联二极管，或在开关分合闸线圈上并联适当数值的电阻，可明显地抑制这种暂态过电压的幅值。

2.6 电磁式电压互感器对暂态电压的响应

电磁式电压互感器通过感性耦合和容性耦合两种方式将一次回路产生的干扰电压传入二次回路。随着二次设备逐渐向微电子化方面发展，对干扰电压的敏感性增强，因此抑制来自电压互感器方面的干扰有着重要的意义。

作用在电压互感器一次侧的干扰电压大部分是在系统短路、雷电波侵入以及

开关操作时产生的。干扰电压的基本方程式为：

$$u = \sum_{n=1}^k u_{mn} e^{-\frac{t}{T_n}} + \sum_{m=1}^k u_{mn} \sin(\omega_n + \theta_m) e^{-\frac{t}{T_m}} \quad (2-21)$$

式中，U 为 n 和 m 项干扰电压的幅值，T_n 和 T_m 分别为 n 和 m 项干扰电压衰减时的时间常数，ω_m 为高频干扰电压的角频率，θ_m 为高频干扰电压的相位角。

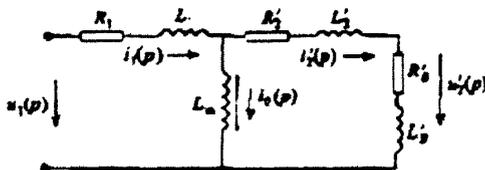
上式表明，一次干扰电压基本上可分为衰减直流部分和高频振荡部分。下面分析电磁式互感器对这两部分电压的响应。

2.6.1 对衰减直流电压的响应

设一次侧干扰电压为按指数衰减的电压波形为：

$$u_1(t) = U_1 e^{-\frac{t}{T}} \quad (2-22)$$

式中，时间常数 T 一般为几个周波。相对于这样的衰减速度，电压互感器内部的分布电容可以忽略不计，其等值电路图如下所示。



R₁, R₂ 一次绕组电阻和二次绕组电阻的折算值, L₁, L₂—一次绕组的电感和二次绕组的电感的折算值;
L_m—励磁电感; R₀, L₀—负载电阻和电感的折算值

图 2-12 电压互感器等值电路图

根据等值电路图可写出下列方程式：

$$\left. \begin{aligned} u_1(p) &= i_1(p)(R_1 + pL_1) + i_0(p)pL_m \\ i_0(p)pL_m &= i_2(p)(R_2 + pL_2) + u_2(p) \\ i_1(p) &= i_2(p) + i_0(p) \\ u_2(p) &= i_2(p)(R_2 + pL_2) \end{aligned} \right\} \quad (2-23)$$

式中，p 为拉普拉斯算子。

解此联立方程式可得：

$$u_2(p) = u_1(p) \frac{pL_m(R_2 + pL_2)}{(R_1 + pL_1)(R_2 + p(L_2 + L_m))} \quad (2-24)$$

式中，R = R₁ + R₂ + R₀; L = L₁ + L₂ + L_m

将式 (2-22) 经过拉氏变换后得：

$$u_1(p) = u_{1c} \frac{1}{p + \frac{1}{T_m}} \tag{2-25}$$

将式(2-25)代入式(2-24)则式(2-24)可写成:

$$u_2(p) = u_{1c} \frac{p(R_b + pL_b)}{L(p + \frac{1}{T_m})(p + \frac{1}{T})(p + \frac{1}{T_m})} \tag{2-26}$$

式中, $T = \frac{L}{R}$; $T_m = \frac{L_m + L_1}{R_1}$ 其中, T_m 为电压互感器的时间常数。

对式(2-26)进行拉氏反变换可得:

$$u_2(t) = U_{1c} [\frac{1}{1 - \frac{T_n}{T_m}} \cdot e^{-\frac{t}{T_m}} \cdot \frac{T_n}{T_m} \cdot e^{-\frac{t}{T_n}} + \frac{R_1 + R_2}{R_b} \cdot \frac{T_n}{T_m - T} \cdot e^{-\frac{t}{T}}] \tag{2-27}$$

对于 110~330kV 的电压互感器而言, 由于 $T_n \ll T_m$, 则式(2-27)中的第二项可以忽略不计。同时由于 T 比较小, 第三项衰减很快, 对 $u_2(t)$ 的影响也比较小, 也要吧忽略不计。二次侧响应电压基本上由第一项决定。由此可见, 一次侧衰减的直流干扰电压可以充分地得到响应, 相当真实地由电压互感器传到二次回路。

2.6.2 对高频干扰电压的响应

如前所述, 由开关操作引起的高频振荡, 其频率可高达数百千周。因此, 研究电压互感器对高频干扰电压响应时, 必须考虑电压互感器内部的分布电容, 将其视为 LRC 的复杂网络。精确地计算这些参数是相当困难的。为作工程上的应用, 可以用下图所示的等值电路。

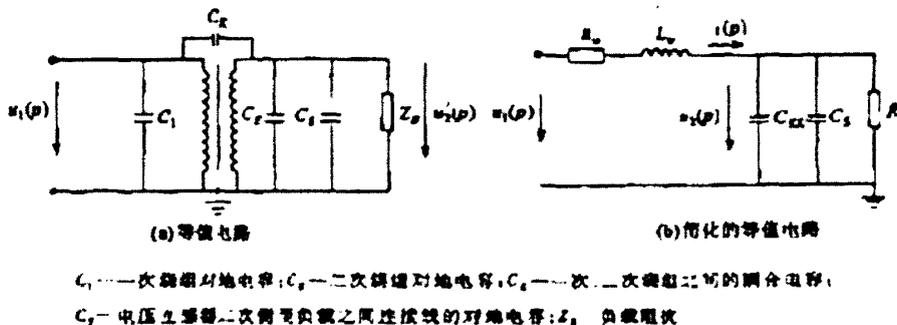


图 2-13 计及绕组分布电容的电压互感器等值电路

并可写出下列联立方程式:

$$\left. \begin{aligned} u_2(p) &= u_1(p) - i_1(p)(R_m + pL_m) \\ u_2(p) &= i_1(p) \frac{R}{(1 + pRC)} \end{aligned} \right\} \tag{2-28}$$

解之可得:

$$u_2(p) = \frac{u_1(p)}{L_w C [p^2 + p(\frac{R_w}{L_w} + \frac{1}{RC}) + \frac{R + R_w}{R L_w C}]}$$
 (2-29)

考虑到一般 $R_w \ll R$, 电压互感器的输出电压可写成:

$$u_2(p) = \frac{u_1(p)}{L_w C [p^2 + p(\frac{R_w}{L_w} + \frac{1}{RC}) + \frac{1}{L_w C}]}$$
 (2-30)

其特征根为:

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2}(\frac{R_w}{L_w} + \frac{1}{RC}) \pm \sqrt{\frac{1}{4}(\frac{R_w}{L_w} + \frac{1}{RC})^2 - \frac{1}{L_w C}}$$
 (2-31)

对于通常使用的电压互感器有:

$$\frac{1}{L_w C} \gg \frac{1}{4}(\frac{R_w}{L_w} + \frac{1}{RC})^2$$
 (2-32)

故式 (2-31) 可简化为:

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2}(\frac{R_w}{L_w} + \frac{1}{RC}) \pm j \frac{1}{\sqrt{L_w C}}$$
 (2-33)

令衰减系数 $\alpha = -\frac{1}{2}(\frac{R_w}{L_w} + \frac{1}{RC})$, 自振荡角频率 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_w C}}$ 并代入式 (2-30) 中, 同时

计及式 (2-32) 的关系, 则式 (2-30) 可变为:

$$u_2(p) = \frac{\omega_0^2}{(p+\alpha)^2 - (\alpha^2 - \omega_0^2)} u_1(p) \approx \frac{\omega_0^2}{(p+\alpha)^2 + \omega_0^2} u_1(p)$$
 (2-34)

由此可得电压互感器对高频干扰电压的传输系数为:

$$K(p) = \frac{u_2(p)}{u_1(p)} \approx \frac{\omega_0^2}{(p+\alpha)^2 + \omega_0^2}$$
 (2-35)

由图 14 给出电压互感器的传输系数 K 与 ω_m / ω_0 的关系曲线 (ω_m 为电压角频率)

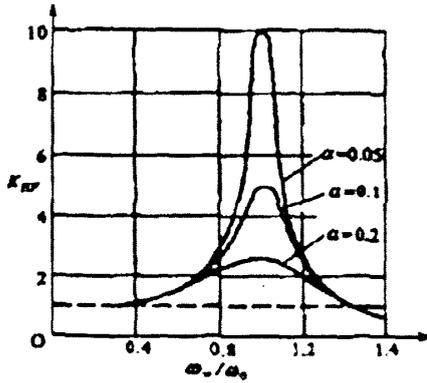


图 2-14 电压互感器对高频干扰电压的传输系数 K 与 ω_m/ω_0 的关系

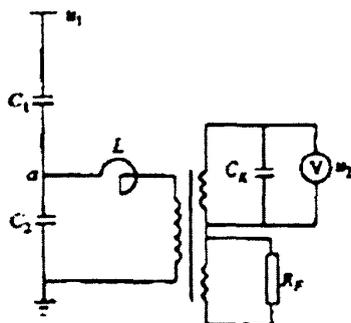
比较图 14 中的曲线可以看出衰减系数 α 对响应电压的影响。当 α 很小和 $\omega_m = \omega_0$ 时，干扰电压的响应幅值很高。增加 α 可以减少干扰电压。实际上，由于一般互感器存在多个谐振频率，单纯采用这一种方法不能完全抑制干扰响应电压。其他有效地抑制干扰电压幅值的方法是在电压互感器的输出回路或者在继电保护等的输入回路中采取措施，如可采用适当的输入滤波器，屏蔽以及稳压管等抑制措施。

2.7 电容式电压互感器对暂态电压的响应

电容式电压互感器以其结构简单，并可兼做载波通信的耦合电容器用等优点，广泛应用于超高压变电所中。高压臂电容对高频电流形成低阻抗通道，所以，高频振荡及其他暂态干扰极易通过电容式电压互感器传入二次回路。

2.7.1 对衰减的直流电压的响应

图 2-15 为电容式电压互感器的原理接线图

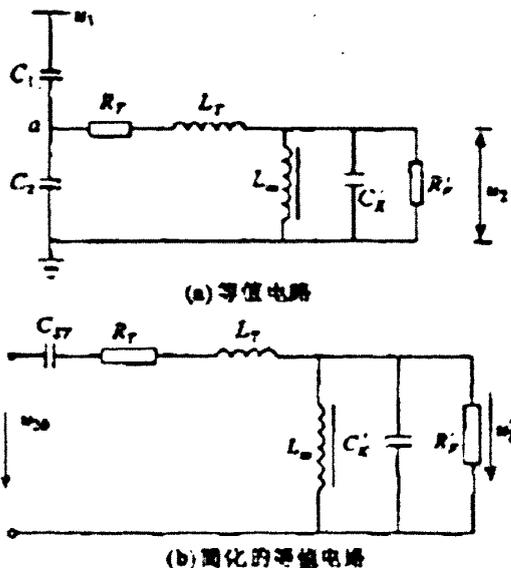


C_1, C_2 —高压电容; L —补偿电感; C_k —补偿电容;
 R_f —抑制铁磁谐振用的阻尼电阻

图 2-15 电容式电压互感器的原理接线图

若忽略电压互感器的负载（铁磁谐振阻尼电阻上的功耗一般为 $400 \sim 600W$ ，远大于电压互感器的额定功率）则电容式电压互感器的等值电路如图 2-16 所示

根据戴维南定理，可以将图 16 (a) 的等值电路进一步简化为 16 (b)，当输入端施加按指数规律衰减的直流电压时，计算表明，输出的干扰电压中既有低频及高频振荡，振荡频率与电压互感器的参数有关。当忽略电压互感器内部的等值电容时，输出电压中只包含低频的衰减电压，如图 16 (a) 所示。如果考虑等值电容，输出电压中将产生高频电压分量，如图 16 (b) 所示。高频分量的幅值与阻



R_f —附加的电容式电压互感器一次绕组和二次绕组的总电阻;
 L_m —包括补偿电感 L 在内的互感器的总漏电感

图 2-16 电容式电压互感器的等值电路

尼电阻 R_f 功耗 P_{rf} 在关, P_{rf} 越大, 高频分量的幅值越低。因此采用适当的阻尼电阻增加功率损耗可以抑制干扰电压。但是, 为了保证在临界条件下高速继电器不误动作, 最好采用滤波电容滤掉直流干扰电压从二次回路中滤掉。

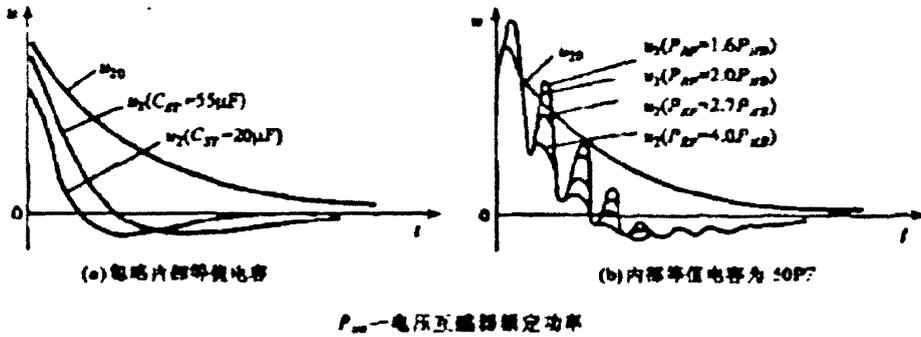


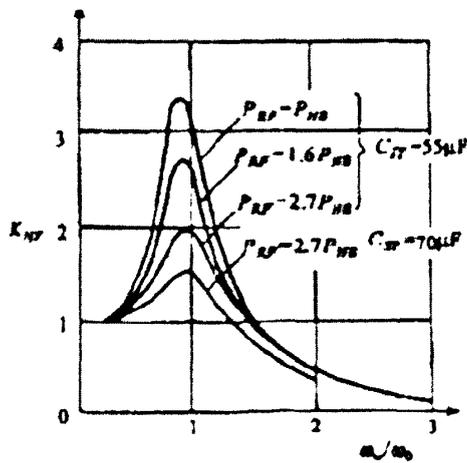
图 2-17 电容式电压互感器的响应电压曲线

2.7.2 对高频干扰电压的响应

研究表明, 电容式电压互感器对高频干扰电压的阻尼能力比电磁式电压互感器高得多, 这种特点对二次回路的保护, 特别是对静态继电保护装置是有利的, 而且, 阻尼电阻 R_f 对阻尼高频振荡电压有明显的效果。图 18 表示 220~400kV 的电容式电压互感器具有不同功耗的阻尼电阻 R_f 时的传输系数 K_{rf} 与 ω_m/ω_0 的关系曲线, 其中传输系数的计算公式为:

$$K = U_2/U_1 \tag{2-36}$$

式中, U_1 、 U_2 分别为高频输入和输出电压的同幅值。



ω_m —高频电压的角频率; ω_0 —电压互感器的固有谐振角频率

图 2-18 电容式电压互感器对高频电压的传输系数与 ω_m/ω_0 的关系

由图 18 可以看出, 在一般阻尼电阻的情况下, 是高传输系数比较低, 不超过 3 倍, 而且当 $\omega_m > 1.4 \omega_0$ 时, 出现对干扰电压的强烈抑制作用。在这种情况下, 经电容式电压互感器传递到二次回路的高频干扰电压对静态保护元件一般不会产生很大的危害。

2.8 高压变电所中的高频辐射干扰源

高压变电所中的局部放电是主要干扰源。高压导线表面及绝缘子金具尖端部位的电晕放电、接触不良产生的火花放电以及污秽绝缘子表面的局部电火花等都会产生电磁辐射, 形成辐射干扰源。另外, 变电所中的高频载波、对讲机等也会产生不容忽视的辐射干扰。以上这些干扰源都应在二次回路设计时予以考虑。

当然, 附近的雷电现象以及大功率的发射机, 如电台、通信等也会影响到变电所中的敏感设备。

2.8.1 电晕

电晕放电时不断形成流注, 引起强烈的电流脉冲, 这些电流脉冲将产生电磁波传播到空间, 在工频交流电压下, 由于每半周内都存在电晕的起始和熄灭阶段, 故能辐射出大量电磁波, 形成电磁干扰。

电晕干扰的强度决定于很多参数, 其中有些参数与导数的几何特征有关, 如导线的尺寸、几何位置及导线表面的电位梯度等。所有这些参数都可以精确地确定, 而且我们可以利用这些参数定量地计算干扰强度。但是, 还有一些参数主要决定于周围环境, 如导线的表面状态和气候条件、海拔高度等。这些参数的影响很难精确估计, 因为它们都带有很大的随机性。

● 导线参数的影响

导线表面电场强度的提高导致干扰强度的增加。电场强度和干扰强度之间存在线性关系。当电场强度不变时, 增大导线半径, 干扰水平也随之增加, 这是由于电晕脉冲功率增加的缘故。采用分裂导线是降低电晕干扰的重要措施之一。分裂导线产生的电晕干扰强度和分裂导线的根数有关。

导线参数的影响可以用以下经验公式表示:

$$NP = NP_0 + \alpha(E - E_0) + \text{blg} \frac{r}{r_0} + f(n) \quad (2-37)$$

式中, NP 为当电场强度为 E 、导线半径为 r 时的干扰强度; NP_0 为参考线路的干

扰强度； a 、 b 为系数，一般为 $2.5 < \alpha < 4.5$ ， $b=40$ ； $f(n)$ 为与分裂导线根数有关的函数。

● 导线表面状态的影响

表面光滑的导线起始电晕电压比较高。当导线表面粗糙或有其他杂质或微粒附着在上面时，不论这些附着物是导体还是电介质，都会形成流注的发源地而使起始电晕电压降低，电晕干扰增强。

导线表面油污也是使电晕增强的重要因素。涂在导线表面的油脂主要是为了防止在运输及放线过程中导线之间以及导线与地面之间磨擦损伤导线。钢芯铝线的钢芯上也常常涂油来防止腐蚀。当气温升高时，油流出来形成表面油污。这些油污粘住空气中的灰尘及昆虫，增加导线表面的粗糙程度，电晕干扰强度也随之增加。

● 气象条件的影响

电晕干扰与环境的气象条件关系很大。大气的温度、压力、湿度、雨量、风等都会影响电晕放电的强度。在气象条件中，雨量的影响最大。雨水可以冲掉导线表面的附着物，使电晕减弱，也可以形成水滴增加电晕干扰源。但是，一般来讲，随着雨量的增加，干扰强度呈增加趋势，最后趋于某个饱和值如下图：

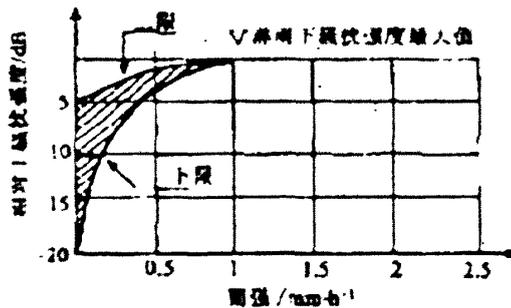


图 2-19 干扰强度与雨量的关系

● 海拔高度的影响

随着海拔高度的增加，空气压力降低，电晕的起始放电场强度减小，因此电晕干扰强度增加，IEC 标准推荐用下式计及海拔高度对干扰的影响：

$$NP = NP_0 + \frac{H - H_0}{300} \tag{2-38}$$

式中， NP 为海拔高度为 H 时的干扰强度， NP_0 为海拔高度为 H_0 时的干扰强度

2.8.2 绝缘子沿面放电引起的辐射干扰

我们知道，在干燥的状态下，沿绝缘子串的电场分布是不均匀的，而且随着电压等级的提高，这种不均匀性愈加严重。因此，在承受电压比较高的绝缘子上，

可能产生局部的沿面放电。根据电压的高低,可能是电晕放电,也可能是滑闪放电。这些局部放电不但腐蚀了绝缘子,也产生了辐射干扰。

在潮湿的气候条件下,沿污秽绝缘子表面流过比较大的泄漏电流。因为表面的污秽沉积不均匀,在污秽层比较薄的区域呈现圈套的电阻,因发热而形成干燥带,形成不稳定的局部火花或电弧。这种局部放电产生的辐射干扰中常常含有频率很高的分量。

对于清洁而干燥的绝缘子,可以通过加装均压环改善电压分布的办法来降低干扰水平;对于污秽绝缘子,则只能采用限制表面泄漏电流的方法加以控制。常用的方法有:

加大泄漏路径,使爬距大于按绝缘要求设计的长度;使用有机合成材料绝缘子,这种绝缘子的伞裙用硅橡胶制成,具有良好的渗水性能,可以有效地限制表面泄漏电流;绝缘子表面涂硅油,增加其渗水性。

2.8.3 变电所开关操作产生的辐射干扰

在前述分析了变电所中隔离开关切合空母线产生的高频振荡过程,这种高频振荡除了通过传导、耦合方式直接干扰二次系统外,当频率足够高时,还会发射电磁波,形成辐射干扰。

在 345kV 及 500kV 变电所大量的实测结果表明,辐射干扰的频率在 0.5 ~ 100MHz 的范围内。在频率为 20MHz 附近的辐射电磁场强度最大,辐射电场强度的幅值为 1 ~ 5kV/m;磁场强度的幅值为 1 ~ 5A/m。脉冲持续时间由几 ns 至 1 μ s。表 2-2 列出美国某 345 和 500kV 变电所中的实测结果。

表 2-2 345kV 与 500kV 变电站中的实测数据

电压等级/kV	开关操作方式	场类型	上升前沿/ μ S	干扰场强幅值 (EkV/m;HA/m)
345	关合隔离开关	电场	0.12	3.2
		磁场	0.02	0.9
	关合隔离开关	电场	0.18	4.2
		磁场	0.06	0.65
	开断隔离开关	电场	0.4	11
		磁场	0.06	1.7
开断隔离开关	电场	0.18	7	
	磁场	0.06	1.5	
关合断路器	电场	0.03	2	
	磁场	0.06	1.3	
关合断路器	电场	0.6	4.5	
	磁场	0.01	0.45	
500	关合隔离开关	电场	0.4	98
		磁场	0.2	35
	关合断路器	电场	1.2	9
		磁场	0.02	0.58
	关合断路器	电场	0.6	3.3
		磁场	----	----
	关合断路器	电场	0.7	4.2
		磁场	0.01	1.2
	关合断路器	电场	0.025	1
		磁场	0.01	2
关合隔离开关	电场	0.6	20	
	磁场	0.18	0.3	
关合隔离开关	电场	1.2	112	
	磁场	0.8	2.2	
关合隔离开关	电场	1.2	22	
	磁场	0.1	3.2	
关合隔离开关	电场	1.0	65	
	磁场	0.2	3.2	

图 2-120 和图 2-21 分别绘出在 500kV 变电所测出的辐射电场强度和磁场强度的波形及其频谱分布

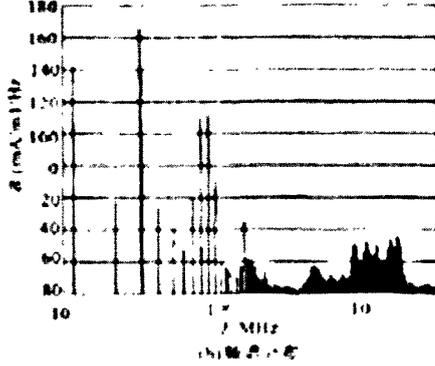
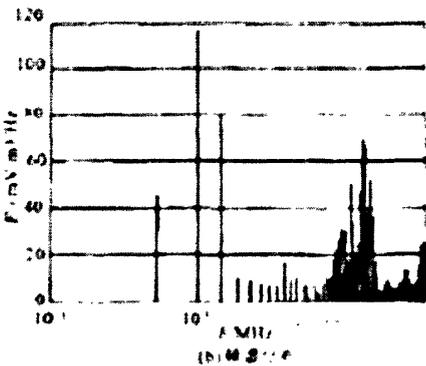
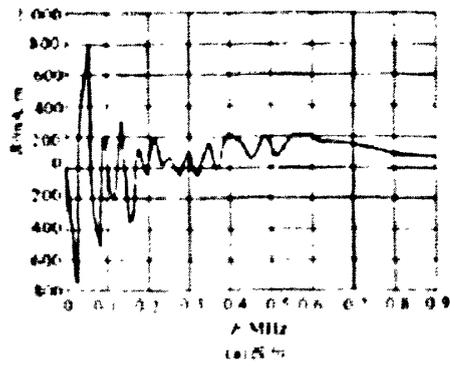
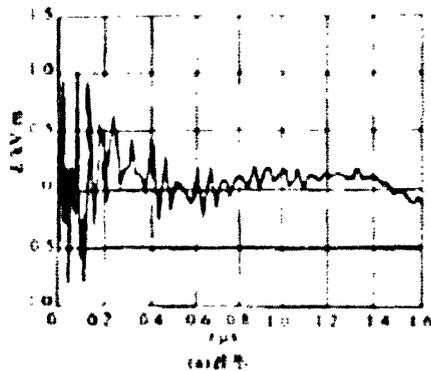


图 2-20 500kV 变电所中辐射电场强度及其频谱分布

图 2-21 500kV 变电所的辐射磁场强度及其频谱分布

2.8.4 雷击变电站避雷针时产生的辐射干扰

雷电是来自大气层中的频繁且强烈的电磁干扰源。根据长期对雷电的观测结果所知，在我国一般地区，年平均雷暴日为 40 个。雷电流为一非周期性冲击波，其幅值与气象、自然条件有关。在我国实测到的雷电流幅值最大可达 200kA 以上，大多低于 100kA。

雷电流的波头和波尾时间比为随机变量。根据实测结果，波头在 1~4 μ s 左右，波长在 40 μ s 左右。

雷击变电站避雷针时，除产生传导干扰外，还产生严重的辐射干扰。闪电放电时，其电流是随时间而非均匀变化的。一次闪电往往由几个短脉冲放电组成。一个中等的雷电放电，其第一个脉冲电流幅值最大约为 30kA，其最大电流陡度大约为 12kA/ μ s。后续的脉冲电流幅值大约只有 12kA，但其最大电流陡度约为

40kA/ μ s, 因此脉冲电流就向外辐射电磁波, 这种电磁脉冲辐射虽然也随着距离的增大而减小, 但却比较缓慢, 闪电的电磁脉冲辐射通过以电磁波的形式耦合到对瞬态电磁脉冲极其敏感的现代电子设备, 在一定范围内造成电子设备的损坏, 甚至引起火灾。

无论是闪电在先导通道中产生的瞬变脉冲电磁场, 或者是进入避雷针系统以及雷击线路避雷线后引起绝缘子闪络后产生的瞬态脉冲电磁场, 都会在空间一定范围内产生电磁作用。它是在三维空间范围内对一切电子设备发生作用, 在闪电通过的避雷针附近, 这种空间的瞬变脉冲电磁场的作用更加强烈些。当闪电发出的脉冲磁场超过 240 μ T 时, 集成电路将发生永久性损坏, 对超大规模集成电路就更不用说了。

2.9 本章小结

通过本章的分析, 我们知道变电站的主要干扰源主要有以下:

- 高压隔离开关和断路器的操作。
- 雷击线路、构架和控制楼。
- 系统短路故障。
- 靠近高压线路受其电磁场作用。
- 局部放电(电晕、沿面放电)。
- 二次回路中的开关操作。
- 电源本身, 如电压波动、电压暂降、短时中断、电源频率变化及谐波等。
- 静电放电。
- 无线电发射机(步话机)

而其传播途径包括:

- 静电耦合
- 电磁耦合
- 地电位差

第3章 综合自动化变电站及微机保护装置概述

在电力系统内,电力主设备继电保护主要经历了电磁式、晶体管式、集成电路式、微机式保护4个阶段。特别是21世纪以来,电力工业突飞猛进,整个电力系统呈现出往超高电压等级、单机容量增大、大联网系统方向发展的趋势,这就对电力设备保护的可靠性、灵敏性、选择性和快速性提出了更高的要求。电力系统相关部门已把变电站自动化作为一项新技术革新手段应用于电力电网,各大专业厂家亦把变电站自动化系统的开发作为重点研发项目,不断地完善和改进,相应地推出各具特色的变电站综合自动化系统,以满足电力系统发展的要求。所谓最新的变电站综合自动化,就是广泛采用微机保护和微机运动技术,分别采集变电站的模拟量、脉冲量、开关状态量及一些非电量信号,经过功能的重新组合,按照预定的程序和要求实现变电站监视、测量、协调和控制自动化的集合体和全过程,从而实现数据共享和资源共享,提高变电站自动化的整体效益。随着智能化开关、光电式电流电压互感器、一次运行设备在线状态检测、变电站运行操作培训仿真、液晶显示、远程监控等技术日趋成熟,以及计算机高速网络在实时系统中的开发应用,“三化”改造和无人值班变电站的进一步发展,要求变电站综合自动化系统运行高效、实时、可靠,从而提高电网安全稳定运行水平。继电保护技术未来趋势将是向计算机化,网络化,智能化,保护、控制、测量和数据通信一体化的方向发展。

新的变电站综合自动化系统,利用组屏取代了常规的仪表屏柜以及一些中央信号装置,经过优化组合成为系统,节省了变电站、控制室和配电室的占地面积,缩短建设工期,提高了变电站的自动化水平,减少人为事故,保证了供电质量,有利于电网安全稳定运行,实现了电力系统的减员增效目标,提高了企业的劳动生产率和经济效益。

现在市场上流通着有各种各样的自动化系统,并且在不断地改进和更新。我们所熟悉的有北京四方 CSC2000 变电站综合自动化系统、南瑞继科技 BSJ-2200 监控系统、国电南自 PS6000 变电站自动化系统、许继电气 CBZ8000 变电站自动化系统、深圳南自的 ISA300 变电站综合自动化系统等。电压等级不同又有一些功能不一致。

3.1 变电站监控系统的主要功能

为满足变电站的安全运行与管理等要求,变电站监控系统的主要功能有:数据采集与处理,数据库的建立与维护、控制操作、防误闭锁,同期检查,报警处理,事件顺序记录及事故追忆,电能量统计处理,远动功能,时钟同步,人机联系,与其它设备接口和运行管理等。

3.1.1 数据采集与处理功能

变电站监控系统应能实现数据采集和处理功能,其范围包括模拟量、开关量、电能量以及来自其他智能装置的数据。

数据采集有两种方式。一种是通过测控装置获取的数据,即面向一、二次设备(如电压互感器、电流互感器的电压和电流信号、变压器温度以及断路器、闸刀辅助触点、一次和二次设备状态信号)采集模拟量和开关量,经间隔层设备处理为计算机数据后,最终进入实时数据库。另一种通过通信接口获取数据,即面向其它功能装置直接获取计算机数据,经统一处理后进入数据库,如电能量数据、直流母线电压信号、保护动作信号等

模拟量的采集

模拟量的采集包括电流、电压、有功、无功、功率因素、频率等。

模拟量的采集有交流和直流两种形式。交流采样是将电压、电流信号不经过变送器,直接接入数据采集单元。直流采样是将外部信号,如交流电压、电流,经变送器转换成适合数据采集单元处理的直流电压信号后,再接入数据采集单元。直流采样主要用于变压器温度、气体压力等非电气量数据的采集

开关量的采集

开关量的采集包括断路器、隔离开关以及接地开关的位置信号、继电保护装置和安全自动装置动作及报警信号、运行监视信号、有载调压变压器分接头位置信号等。这些信号都以开关量的形式,通过光隔离电路输入至计算机。

电能量采集

电能量的采集包括有功电能量和无功电能量数据,并能实现分时累加、电能平衡等功能。

通过通信接口采集

对通过数据通信接口采集到变电站各类智能设备的各种信息,由计算机监控

系统分别对这些数据进行处理。如来自 ERTU（电能量远方传输装置）的电能量、直流监测装置的直流系统绝缘电阻、微机保护装置及自动装置的信息等。

数据采集及处理是变电站监控系统得以执行其他功能的基础。

3.1.2 数据库的建立与维护

变电站监控系统通过建立系统参数库、实时数据库和历史数据库。通过建立系统参数库，构建系统运行平台，使系统实现各项所需的功能；通过建立实时数据库，存储并不断更新来自测控装置及通信接口的全部实时数据；通过建立历史数据库，存储并定期更新需要保存的历史和运行报表数据。

数据库能进行在线维护，增加、减少、修改数据项。能利用数据库管理程序进行数据库的生成，并具有合理的初始化数据。

3.1.3 控制操作功能

变电站监控系统操作对象包括：各电压等级的断路器以及隔离开关、电动操作接地开关、主变压器及站用变压器分接头位置、站内其它重要设备的启动停止。

操作有人工控制和自动控制两种控制方式。

人工控制包括远方控制中心控制、站控层控制和间隔层就地控制，并具备远方控制中心/站控层、站控层/间隔层就地控制的切换功能。控制级别由高到低顺序为：间隔层就地、站控层、远方控制中心，三种控制级别间应相互闭锁，同一时间只允许一级控制。当监控系统站控层及网络停运时，能在间隔层对断路器进行一对一操作。

自动控制包括顺序控制和调节控制。顺序控制是指按设定步骤进行操作，即将旁路代、倒母线等成组的操作在操作员站上预先选择、组合，经校验正确后，按要求发令自动执行。调节控制是指对电压、无功的控制目标值进行设定后，监控系统自动按要求的方式对电压及无功进行联合调节。其中包括自动投切无功补偿设备和调节主变压器分接头位置。

3.1.4 防误闭锁功能

目前，变电站防止电气误操作的技术措施是通过防误闭锁系统的方式来实现的。监控系统使传统的单纯闭锁方式得以发展，它包括机械程序锁、电气联锁、以及可提供编码锁的微机“五防”工作站等。变电站的所有操作控制均应经防误闭锁，并有出错报警和判断信息输出。

3.1.5 同期检查功能

采用监控系统的变电站,不再设置独立的同期装置。由监控系统完成所需的同期和闭锁功能,以满足断路器的同期合闸和重合闸同期闭锁的要求。

在监控系统中,同期功能通常由间隔层的测控装置一对一实现,即每台断路器都有自己的同期检查功能。不同断路器的同期指令间需要相互闭锁,以满足一次只允许一个断路器同期合闸。站控层具有对同期操作过程进行监测和控制的功能,如正确显示断路器两侧设备的电压值,以便监视二次电压回路是否正常。这是确保同期功能有效的技术措施

3.1.6 报警处理功能

监控系统报警内容包括:设备状态异常、故障,测量值越限有监控系统的软硬件、通信接口及网络故障等。

通过对报警信息的分类和分层管理,有利于查阅、检索。过多的报警信息会使运行人员无法识别和进行有效的处理,以致真正的重要信息被淹没。查阅和检索的方式以方便运行人员监视和事后故障分析为原则

3.1.7 事件顺序记录(SOE)及事故追忆功能

监控系统的事件顺序记录处理内容主要包括断路器跳、合闸记录,继电保护装置及自动装置的动作顺序记录,断路器、隔离开关、接地开关、变压器分接头等操作顺序记录,模拟输入信号超出正常范围等。

事件顺序记录功能就是采集所有断路器的状态变化接点信息和所有继电保护及安全自动装置的出口跳闸或自动合闸的接点信息,并记录各接点信息的变化时间,按发生时间的先后顺序进行记录、保存在站控层的主机中,SOE信息可以随时调用,可显示在计算机屏幕上或进行打印输出。通过对SOE的信息查询,也可以及时核对断路器、继电保护及安全自动装置的动作是否正确。

3.1.8 电能量统计处理功能

计算机监控系统具有对变电站有各种采集到的电能量进行处理,对电能量进行分时段的统计计算,适应运行方式的改变而自动改变计算方法并在输出报表上予以说明的功能。

电能表测量的输出方式有两种,脉冲量输出和串口通信输出。监控系统对电能量的采集方式也有两种:直接脉冲计数;通过与电能量远方传输终端(ERTU)

通信方式间接采集。

3.1.9 远动 (RTU) 功能

计算机监控系统应能实现 DL5002-1991《地区电网调度自动化设计技术规程》、DL5003-1991《电力系统调度自动化设计技术规程》中与变电站有关的全部功能,满足电网电能实时性、安全性、可靠性。

变电站监控系统具有完整的数据采集功能和通信功能。只要在监控系统的基础上增设远动通信工作站,就可以实现远动系统变电站设备的所有功能。

3.1.10 时钟同步功能

变电站监控系统宜采用 GPS 标准授时信号进行时钟校正。同时应具有通过远动通信设备接收调度时钟同步的能力。

主爆发站监控系统中,各间隔层子系统与 GPS 标准时钟的误差就不大于 1mS。GPS 自身的授时精度为纳秒级,若各间隔层子系统与 GPS 标准时钟的误差 $<1\text{mS}$,则将其视为各间隔单元间的相对误差,从而,事件顺序记录 2mS 的分辨率得到保证。

3.1.11 人机联系功能

变电站采用监控系统后,运行人员在操作员站上,通过操作鼠标或键盘,就可以对全站的运行工况、运行参数一目了然,可对全站断路器和隔离开关进行分、合闸操作,彻底改变了传统的依靠指针式仪表和模拟屏或操作屏等进行操作。

3.1.12 与其他设备接口的功能

监控系统应具有与其他智能设备,如微机保护及安全自动装置、变电站直流系统监测装置、ERTU 等接口,以实现与站内各种智能设备的接口通信功能,以获得更多、更详细的信息。

常用的智能设备通信接口主要有以下几种:

● 继电保护及安全自动装置通信接口

该接口主要实现以下功能:

- ✓ 读取继电保护装置的启动、动作、测距、重合闸等记录报告,供专业人员分析使用;
- ✓ 读取继电保护及安全自动装置的定值,供检查核对使用;
- ✓ 读取继电保护及安全自动装置的实时测量值,供检查核对使用;

- ✓ 远方修改继电保护及安全自动装置的整定值

- 变电站直流系统绝缘检测装置的通信接口

该接口主要是读取和显示直流系统的电源电压、直流电源下正、负极对地电压；直流系统绝缘下降告警；直流接地选线结果等显示

- 变电站直流蓄电池巡检装置的通信接口

- ERTU 的通信接口

3.1.13 运行管理功能

监控系统应根据运行要求，实现各种管理功能。对生产过程的运行状况管理是采用监控系统，提高运行水平的一个重要方面。它能将已获得的各种数据进行二次加工，得出一些有用的信息。

管理功能一般包括：运行操作指导、事故记录检索、在线设备管理、操作票开列、模拟操作、运行记录及交接班记录等。管理功能是在操作员工作站上实现的，它直接与生产过程密切相关。

3.2 变电站监控系统的基本结构形式

变电站监控系统随着电子技术、微机技术、通信技术和网络技术的发展，其体系结构也在不断发生变化，性能和功能以及可靠性等也在不断提高。根据目前计算机监控系统在变电站的具体应用情况，其结构形式主要有集中式和分层分布式两种。其中分层分布式监控系统已成为变电站监控系统技术发展的主流方向。

3.2.1 集中式监控系统的结构及特点

- 集中式监控系统的基本概念

以变电站为对象，面向功能设计的监控系统，称之为集中式监控系统。即各系统功能都以整个变电站为一具体对象集中设计，而不是以变电站内部的某元件、间隔为对象独立配置的方式。

- 基本组成

集中式变电站监控系统主要由以下几个部分组成：

- ✓ 模拟量输入单元
- ✓ 数字量输入单元
- ✓ 脉冲量输入单元

- ✓ 数字量输出单元
- ✓ 总控单元
- ✓ 人机联系

这种集中式结构是根据变电站的规模，配置相应容量的集中式监控主机及数据采集系统，它们安装在变电站的主控制室内。

- 集中式监控系统的主要特点

- ✓ 主要优点：功能单元间相互独立，互不影响；具有为完善的人机接口功能，综合性强；结构紧凑，体积小，造价低，尤其对 110kV 或规模较小的变电站有利
- ✓ 主要缺点：每台计算机的功能较集中，如果一台计算机出故障，影响面较大；软件复杂，修改工作量大；组态不灵活，不利于批量生产，不得推广。

3.2.2 分层分布式监控系统的结构特点

- 分层分布式监控系统的基本概念

分层分布式系统是以变电站内的电气间隔和元件为对象，面向对象设计、采用分层分布式结构的计算机监控系统。

根据 IEC TC57 提出的变电站控制系统的基本结构，一个现代的分层分布式变电站控制系统是一个三层结构，即站控层、间隔层和过程层。每一层由不同的设备或不同的子系统组成，完成不同的功能。变电站监控系统由站控层和间隔层两个基本部分组成。

- 主要硬件设备

- ✓ 站近层设备：主要包括主机、操作员站、工程师站、远动通信设备、与电能量计费系统的接口以及公用接口等，其通常放在主控制室和主控楼机房。
- ✓ 间隔层设备：主要包括测控装置、间隔层网络、与站控层网络的接口、继电保护通信接口装置和其他智能设备等。
- ✓ 网络设备：包括站控层网络设备和间隔层网络设备，通常由网络集线器、交换机、光电转换器、接口设备和传输介质等组成。

- 主要特点

- ✓ 结构分层分布
- ✓ 面向对象设计
- ✓ 功能独立
- ✓ 多 CPU
- ✓ 继电保护相对独立
- ✓ 模块化结构
- ✓ 安装布置灵活

分层分布式系统代表了现代变电站自动化技术发展的趋势,大幅度地减少了连接电缆,减少了电缆传送信息的电磁干扰,且具有很高的可靠性,比较好的实现了部分故障不相互影响,方便维护和扩展,大量现场工作可以一次性地在设备制造厂家完成。

3.3 微机保护装置概述

微机监控系统和微机保护在电力系统已得到广泛的应用。微机继电保护有如下优点:

- ✓ 维护调试方便。微机保护装置具有自诊断功能,对硬件各部分和存放在 EFRMO 中的程序不断进行自动检测,一旦发现异常就会发出警报,所以对微机保护装置不必象以前的保护一样通过所有的模拟试验来校核,大大减轻运行维护的工作量。
- ✓ 可靠性高。计算机在程序指挥下,有极强的综合分析和判断能力,因而它可以实现常规保护很难做到的自动纠错,即自动识别和排除干扰,防止由于干扰而造成的误动作。另外它有自检功能,通过硬件多重化配置可以有效防止拒动。
- ✓ 易于获得附加功能。微机保护能实现故障录波,对线路保护还能提供测距计算。在配置打印设备或显示设备后,能够提供系统故障后的多种信息。在系统正常运行时,也可以提供各种运行参数。
- ✓ 灵活性大。微机保护的特性主要由软件决定,只要改变软件就可以改变保护的特性和功能,能灵活适应电力系统运行方式的变化。
- ✓ 保护性能得到很好改善。采用微机保护后,许多原有形式保护中的技术难题,得到了很好的解决。如接地距离保护允许过渡电阻的能力,如何

区别振荡和短路，大型变压器差动保护如何识别涌流及内部故障等。

但是微机保护由于工作电压低，所处环境恶劣且长期处于工作状态，对于各种干扰也就相对敏感得多，必须从硬件和软件两方面加强微机保护的性能。

3.3.1 微机保护的硬件概述

目前，微机保护装置的硬件采用了超大规模集成电路技术的最新成果，具备了总线不引出芯片的不扩展单片机，具有高抗干扰的特性，采用了高分辨率的VFC模数转换技术，提高了保护的精度和速度，具有直接联网的高速数据通信接口中，大大提高了保护的通信速度和可靠性。可以方便地利用PC机对保护调试及离线分析系统故障的录波记录。

一、 微机保护的硬件框图

微机保护的硬件结构通常由六个部分构成，即信号输入电路、单片微机系统、人机接口部分、输出通道回路、通讯回路及电源部分。

如图 3-1 所示。

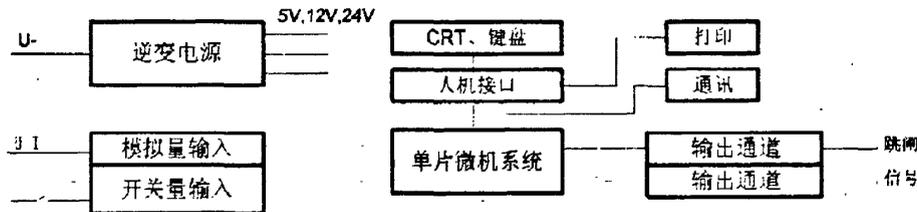


图3-1 典型微机保护系统硬件框图

(1)、信号输入电路

微机保护装置输入信号主要有两类，即开关量和模拟量信号。单片机所采集的信号是弱电信号。在电流互感器、电压互感器与电子电路(单片机)之间要求设置一些传变环节，即信息预处理环节，需要隔离屏蔽。计算机只能接收数字脉冲信号，需要通过模数转换将模拟量信号转换为数字信号。

图 3-2 (a)为典型的数字信号输入回路。

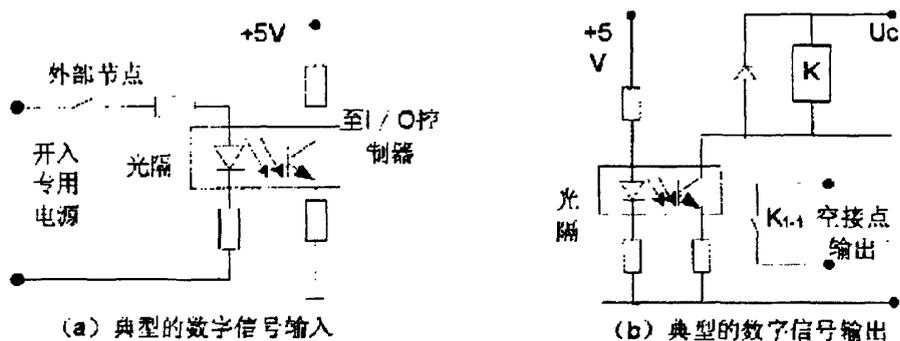


图3-2 数字信号输入输出

(2) 单片微机系统

微机保护装置的核心是单片微机系统，它是由单片微机和扩展芯片构成的一台小型工业控制微机系统，如 CPU、存储器、定时器、计数器等，主要完成数值测量、计算、逻辑运算、逻辑控制和记录等智能化任务。

(3) 人机接口部分

在很多情况下，单片微机系统必须接受操作人员的干预，如整定值的输入、工作方式的变更、执行各种操作功能、对单片微机系统状态的检查等都需要人机对话。这部分工作在 CPU 控制之下完成，通常可以通过键盘、液晶屏显示、打印及信号灯、音响或语音告警等实现。

(4) 输出通道部分

输出通道部分是对控制对象实现控制操作的出口通道。各通道的主要任务是将小信号转换为大功率输出，满足驱动输出的功率要求。通常为了避免将外部干扰信号经过输出回路进入微机内部，一般均在输出回路中采用光电隔离芯片。图 3-2 (b) 为典型的数字信号输出回路。

(5) 通讯部分

新型的微机型继电保护装置都具有与上位机和下位机以及 CP 机调试软件通讯功能。采用专用的通讯模块，通过 CPU 控制，实现与上位机和下位机以及与其它保护装置的通讯功能。通讯的接口主要有 485、232 接口和以太网接口。

(6) 电源部分

微机保护系统对电源的要求较高，通常这种电源是逆变电源，即将直流电逆变为交流电，再整流转换为微机系统所需的直流电压。通过这种逆变电源转换，

将强电系统的直流电源与微机的弱电系统

电源完全隔离开，具有极强的抗干扰能力，对来自变电所或电厂中因断路器跳合闸等原因产生的强干扰和直流电压的波动干扰可以完全消除掉。

微机保护装置均按模块化设计，所不同的是软件系统及硬件模块化的组合与数量不同。不同的保护用不同的软件来实现，不同的使用场合用不同的组合方式构成。

二、 微机保护的数据采集系统

模拟量输入电路是微机保护装置中很重要的电路，保护的動作速度和测量精度等性能都与该电路密切相关。模拟量输入电路的主要作用是隔离、规范输入电压及完成模数变换、以便与 CPU 接口，完成数据采集任务。

微机保护的模数变换方式主要有两种，即 ADC 和 VFC 的变换方式，VFC 是将模拟量电压先转变为频率脉冲，通过脉冲计数变换为数字量的一种变换方式。ADC 是直接將模拟量转变为数字量的变换方式

(1) ADC 式数据采集系统

ADC 变换模式有电压形成回路、模拟低通滤波器 (AL)F、采样保持电路 (S/H)、模数变换器 (A/D) 及多路转换开关等五个部分，如图 3-3 所示。各模块简介如下。

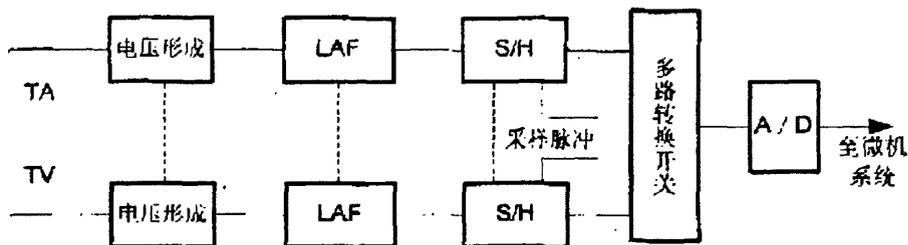


图3-3 ADC数据采集系统框图

1)、电压形成回路:采用各种中间变流器将二次电流电压量变换为能适应模数变换器要求的电压士 5V 或士 10V。交流电流的变换一般采用电流变换器，这种变换器在非周期分量作用下易饱和，产生失真。有时在暂态时需变换输入波形，则需采用电抗变换器，能抑制直流分量，放大高频分量。电压形成回路除了进行电量变换外，还起隔离作用，以减弱来自高压系统的电磁干扰。

2)、采样保持回路:实际应用中，采样的频率一般为输入量频率的 5 倍，以利于改善测量精度，采样保持回路将采样得到的时间上离散的模拟量在 A/D 转换过程

中保持恒定。

3)、低通濾波回路:大多数的微机保护原理都是反映工頻分量或其某种高次谐波,利用低通濾波器濾除在故障的暫态期間无用高次谐波成分

4)、多路转换器:由于模数转换接口复杂且价格昂贵,通常是多个采样保持器共用一个模数转换器,由多路转换器通过译码驱动保证同时采样和依次模数变换的要求。

5)、A/D转换电路:微机保护用的模数转换器大多为逐次逼近式A/D转换,由高位开始,逐位逼近运算以得到足够精度的采样。其分辨率主要取决于设定数码的最小量化单位,数字倍数越多,精度越高,但分辨率越高,转换速度就越低。通常每次转换时间不低于25ps,而数字位数为10-12位。

(2) VFC 式数据采集系统

VFC 变换的基本原理是将输入的电压信号转换为相应频率的脉冲信号,然后在固定时间间隔内对此脉冲信号进行计数。VFC 的输出电压频率 f 与输入电压信号 U_i 成正比,计数器的计算结果即为与 U 对应的数字量。实用的 VFC 模数转换电路如图 3-4。

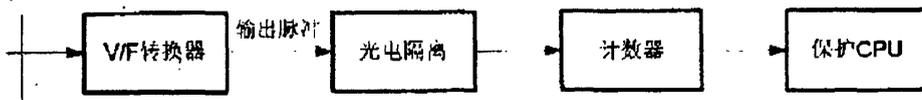


图3-4 典型VFC模数转换原理框图

其中保护 CPU 定时读取计数器在若干个采样周期内的计数值,转换结果 R 相当于输出电压 u 频率在某一时间段内对时间的积分,即

$$R_i = \int_{i-n_{rs}}^i f(t) dt \quad (3-1)$$

3.3.2 微机保护的软件原理

● 微机保护的软件配置

微机保护的软件按其作用分,主要有以下几个模块:接口软件、保护配置软件、中断服务程序

(1) 接口软件:即监控程序和运行程序。监控程序主要是键盘命令处理程序,是为接口插件(或电路)及各 CPU 保护插件(或采样电路)进行调试和整定而设置的程序。接口软件的运行程序由主程序和定时中断服务程序构成,主程序主要完成

巡检(各 CPU 保护插件)、键盘扫描和处理故障信息的排列和打印;定时中断服务完成软件时钟同步设置和检测各插件中启动元件启动与否等。

(2)保护配置软件:包含主程序和两个中断服务程序。主程序通常都有初始化和自检循环模块、保护逻辑判断模块和跳闸(及后加速)处理模块。对不同的保护装置,软件差异最大是保护逻辑判断模块。中断服务程序有定时采样中断服务和串行口通讯中断服务程序。

(3)中断服务程序:用于 CPU 响应并及时处理各种外部随机事件。对于保护装置,外部事件主要为电力系统状态、人机对话、系统微机的串行通信要求,保护装置必须时刻掌握保护对象的系统状态,采用定时中断进行此类处理。人机对话是通过键盘中断服务程序完成的,而串行通信常用主从式方式,用串行通信中断服务程序完成。

● 微机保护主程序框图原理

微机保护的主程序典型框图如图 3-5,其主要模块作用简述如下。

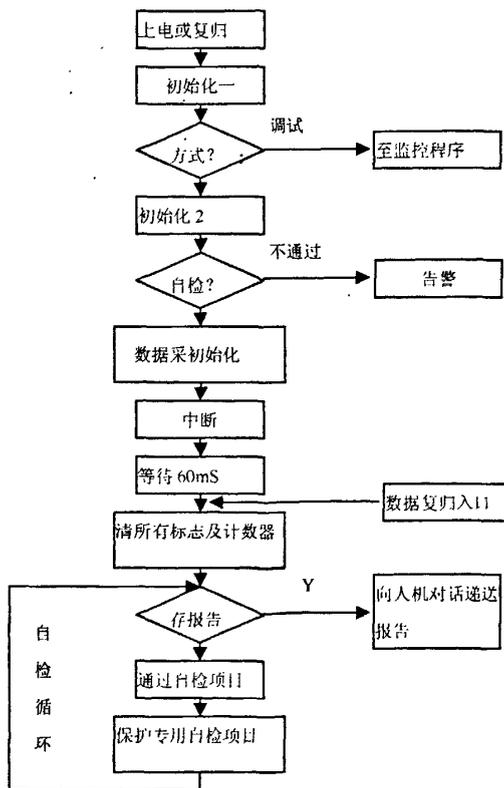


图 3-5 微机保护的典型程序框图

(1) 初始化

初始化主要是对单片微机(CPU)及可编程扩展芯片的工作方式、参数的设置,以便在后面程序中按预定方案工作。初始化的主要内容有:对保护输出的开关量出口初始化,赋以正常值,保证出口继电器均不动作;对定时器初始化,控制采样间隔时间,对RAM区中要使用的软件计数器及各种标志位清零等;对数据采集系统的初始化等。

(2) 自检

自检的内容为:ARM的读写检查,定值检查,EPROM求和自检和开出自检。

(3) 开放中断与等待中断

(4) 自检循环

在开放了中断后,所有准备工作就绪,主程序进入自检循环阶段。故障处理程序结束返回主程序,也是在这里进入自检循环的。这是保护运行的重要程序部分。通用自检一般是定值监视和开入量监视。

● 微机保护通用软件模块说明

微机保护的软件中,采样中断服务和故障处理程序是必需的,但对不同的装置和不同的保护类型,其软件实现的方式不同。

(1) 采样计算程序

在采样中断服务中,对三相电流、零序电流、三相电压、零序电压及线路电压等的瞬时值同时采样,在计算时,取某个计算的模拟量的同一周期的一组瞬时值,采用某种算法进行计算。无论是运行、还是采样通道调试都要进入采样中断服务程序,都要进行采样计算。因此,在采样中断服务程序中,完成采样计算后,需要查询现在处于何种工作方式。

(2) TV断线自检

TV断线的判据一般是:正序电压小于30V,而任一相电流大于 $0.1I_n$;负序电压大于8V。当满足上述任一条件后必须延时1.05S才能确定母线TV断线,在TV断线期间,通过程序闭锁自动重合闸并根据控制字决定是否退出与电压有关的保护。

(3) TA断线自检

大接地电流系统可以用以下判据检查AT断线:

$$\left| \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c \right| - \left| 3\dot{I}_0 \right| > I_{d1} \quad (3-2)$$

$$\left| 3\dot{I}_0 \right| < I_{d2} \quad (3-3)$$

式中， I_{d1} 和 I_{d2} 为 TA 断线的两个电流定值。

(4) 起动元件

为了提高保护动作的可靠性，用软件实现起动元件闭锁保护装置的出口。起动元件起动后，标志位“KST”置 1，解除保护装置出口闭锁。起动元件采用相电流突变量的起动方式。为克服频率偏移额定值时产生的不平衡电流，多采用相电流差突变量起动方式，提高抗干扰能力。起动方程可表示为：

$$\left| \Delta I_A - \Delta I_B \right| \geq I_{set} ; \left| \Delta I_B - \Delta I_C \right| \geq I_{set} ; \left| \Delta I_C - \Delta I_A \right| \geq I_{set} \quad (3-4)$$

当采样中断服务程序的起动元件判别保护起动后，程序转入故障处理程序。进入故障处理程序后，CPU 的定时采样仍不断进行。采样计算完成后，检测保护是否起动过，如 $KST=1$ ，直接转到采样中断服务程序出口，然后再回到故障处理程序。

(5) 故障处理程序

故障处理程序包括保护软压板的投切、保护定值比较、保护逻辑判断、跳闸处理程序和后加速部分等。其框图如右图 3-6。

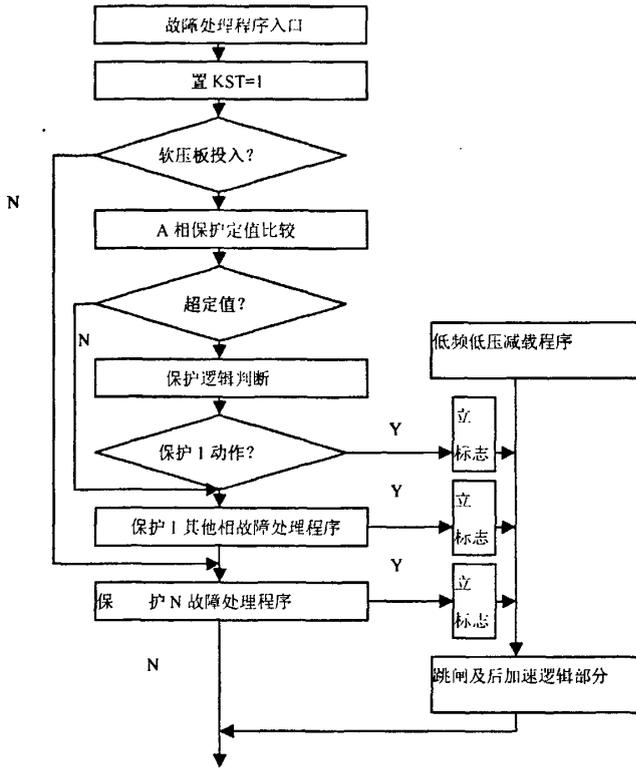


图 3-6 故障处理程序框图

进入故障处理程序入口，首先置标志位 KST=1，开放保护。由于一个 CPU 分别处理多个保护功能，先查询保护压板，若保护压板投入且超定值，则进入该保护的逻辑判断程序，如保护动作，进入跳合闸及后加速故障处理程序。

故障处理结束后程序返回到主程序的自检循环部分。若保护逻辑判断不应动作，也返回到主程序的自检循环部分。

3.3.3 微机保护的算法及数字滤波器

微机保护的算法是软件中的关键问题。主要考虑的是计算的精度和速度。算法的速度包含两方面，一是算法所要求的采样点数(数据窗长度)，二是算法的运算工作量。两者往往是矛盾的。另外要考虑算法的数字滤波功能，即滤除影响精确计算的高次谐波分量。微机保护的数字滤波用程序实现，可靠性高。

保护的算法主要有:半周积分算法，傅氏变换算法，解微分方程算法，最小二乘法等。

- 算法比较

(1) 半周积分算法

半周积分算法的依据是一个正弦量在任意半周期内绝对值的积分为一个常数 S，且积分值 S 和积分起始点的初相角 α 无关。因此，半周期的面积为

$$S = \int_0^{\pi/\omega} \sqrt{2} I |\sin(\omega t + \alpha)| dt = \int_0^{\pi/\omega} \sqrt{2} I \sin \omega t dt \quad (3-5)$$

从而：

$$I = \frac{S\omega}{2\sqrt{2}} \quad (3-6)$$

在半周面积 S 求出后，可由式 (3-6) 算出正弦量的有效值。其余量如电压 U 同样类似计算。而可用梯形法求各算出：

$$S \approx \left[\frac{1}{2} |I_0| + \sum_{k=1}^{N/2-1} |I_k| + \frac{1}{2} |I_{N/2}| \right] T_s \quad (3-7)$$

式中为第 K 次采样值，N 为一周期的采样点数， $I_{N/2}$ 为 $K=N/2$ 时的采样值， I_0 为 $K=0$ 时的采样值， T_s 采样周期。只要采样点数 N 足够多，用梯形法求积分的误差可以很小。

半周积分算法本身具有一定的高频分量滤除能力，因为迭加在基波上高频分量在半周期积分中其对称的正负半周互相抵消，未被抵消部分的比重就很少了，但这种算法不能抑制直流分量，仍需与数字滤波器配合。这种算法的运算工作量较小，对于一些要求不高的电流电压保护可采用此算法。但此算法的局限性是要求采样的波形为正弦波。

(2) 傅氏变换算法

当被采样的模拟量不是正弦波，而是一个周期性时间函数时，可采用傅氏变换算法。傅氏变换算法依据是傅里叶级数，即一个周期性函数 $i(t)$ 可用下式表示：

$$i(t) = \sum_{n=0}^{\infty} (b_n \cos n\omega_1 t + a_n \sin n\omega_1 t) \quad (3-8)$$

式中， $n=0, 1, 2, 3, \dots$ 表示谐波分量次数。于是电流 $i(t)$ 中的基波分量可表示为

$$i(t) = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega_1 t + \alpha_1) \quad (3-9)$$

式中， I_1 为基波有效值， α_1 为 $t=0$ 时基波分量初相角。由式 (3-9) 中的两式可得

$$a_1 = \sqrt{2} I_1 \cos \alpha_1; b_1 = \sqrt{2} I_1 \sin \alpha_1 \quad (3-10)$$

根据傅氏级数的逆变换原理，可求得 a_1 和 b_1

$$a_1 = \frac{2}{T} \int_0^T I(t) \sin \omega_1 t dt; b_1 = \frac{2}{T} \int_0^T I(t) \cos \omega_1 t dt \quad (3-11)$$

在微机中，通常采用梯形法计算 a_1 和 b_1 ：(式中 N 为一个基波周期的采样点数)

$$a_1 = \frac{1}{N} \left[2 \sum_{k=1}^{N-1} I_k \sin\left(\frac{2\pi}{N} k\right) \right] \quad (3-12)$$

$$b_1 = \frac{1}{N} \left[I_0 + 2 \sum_{k=1}^{N-1} I_k \cos\left(\frac{2\pi}{N} k\right) + I_N \right] \quad (3-13)$$

根据式 (3-10) 可得到基波的有效值和相角：

$$I_1^2 = \frac{a_1^2 + b_1^2}{2}; \alpha_1 = \arctan \frac{b_1}{a_1} \quad (3-14)$$

与半周积分算法相比，傅氏变换算法可以计算周期性时间函数，还可算出初始相角，积分运算同样具有数字滤波功能，运算工作量不大。但这种算法用于暂态采样计算时，受输入模拟量中非周期分量影响较大，通常要采用一些补偿措施加以克服。目前的保护装置大多都采用此算法。

(3) 解微分方程算法

此种方法主要用于微机距离保护中计算阻抗。此算法利用电力线路的电压微分方程关系，是一种 R-L 串联模型算法。其前提是假设线路的分布电容可以忽略不计，当输电线路发生故障时 J 从故障点到保护安装处的线路可用电阻 R_1 和电感 L_1 串联电路表示为

$$U = R_1 + L_1 \frac{di}{dt} \quad (3-15)$$

式中 R_1 和 L_1 是故障点至测量端间线路段的正序电阻和正序电感。已知采样电流和电压时，可解出 R_1 和 L_1 。微机计算时电流的导数用差分法计算，只要采样点数足够多，计算就可以足够精确。

解微分算法忽略了输电线路分布电容，会产生计算误差，需与数字滤波器配合使用。常用做法是采用长数据窗和短数据窗两种数字滤波器与微分方程算法相结合。首先采用短数据窗滤波器对故障信号进行粗略滤波，以加快近区故障的切除速度。而对于工段保护末端附近的故障采用长数据窗的滤波器精确滤波以确保选择性。

(4) 最小二乘法

这种算法是将输入量与一个预设的含有非周期分量的函数按最小二乘法原理进行拟合，即让被处理的函数与预设函数尽可能逼近，其方差最小，从而求出

输入信号中的基频及各种暂态分量的幅值和相角。

这种算法是假定输入信号是由衰减直流分量和有限项的整数倍谐波分量组成的，存在算法误差。

这种算法可能获得很好的滤波性能和很高的精度，但预设的模型越复杂，精度越高，计算时间也越长。

● 数字滤波器

和模拟滤波器不同，数字滤波器直接对输入信号的离散采样值进行滤波计算，形成一组新的采样值序列参与参数计算。滤波流程图如图 3-7。

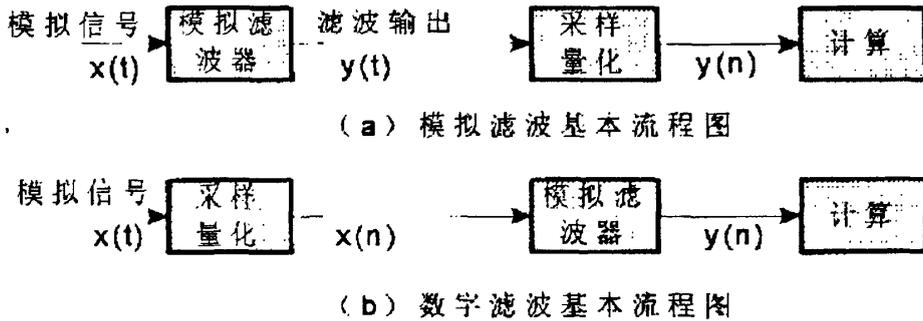


图 3-7 滤波基本流程图

数字滤波是指一种算法，在微机保护中，数字滤波器的运算过程可用下述常系数线性差分方程来表示：

$$y(n) = \sum_{i=0}^m a_i x(n-i) + \sum_{j=0}^m b_j x(n-j) \quad (3-16)$$

式中， $x(n)$ 和 $y(n)$ 分别为滤波器的输入值和输出值序列， a_i 和 b_j 为滤波器参数。

通过选择滤波器参数可滤除输入序列中的某些无用频率成分，使输出序列能更明确地反映有效信号的变化特征。对大多数微机保护，保护原理只用到基频或某次谐波，对滤波器特性要求是阻带衰减大，过渡带下降陡，对高次谐波等干扰分量幅值衰减大，通带不能太窄，以保证系统频率发生波动时有足够的增益。

与模拟滤波器相比，数字滤波器的特点是：

- ✓ 滤波精度高；
- ✓ 具高度灵活性，可灵活调整其滤波特性。
- ✓ 稳定性高，几乎不受环境和温度影响；
- ✓ 便于分时复用，一台数字滤波器即可完成所有通道的滤波任务。

3.4 本章小结

现代的变电站综合自动化系统主要由监控系统和微机保护系统组成，他们是一个有机整体，且大部分由计算机组成，因此他们的抗干扰水平也在一定程度上决定了目前变电站的安全运行水平。本章主要介绍了目前监控系统的主要功能和结构特点，以及微机保护装置的组成。微机保护装置由硬件和软件方面组成，硬件方面主要由 I/O 系统、数据采集系统、数据处理系统、通信接口以及人机对话和电源等方面组成；而软件则主要由各种算法组成，他们共同组合完成保护装置的各项功能。

第 4 章 二次回路的抗干扰措施

干扰信号对二次回路安全及保护装置动作正确性的危害有目共睹，对各类干扰采取针对性的措施，抑制其强度，减小其危害是必要的。就二次回路本身而言主下包括下述的常用措施如下。

4.1 防止静电耦合干扰的措施

抑制静电耦合产生的干扰，可以采用增大耦合阻抗，对二次回路及保护装置进行屏蔽，合理选择二次设备元器件参数等方法进行一致。

(1) 从式 (2-1) 可以看出，在相同干扰源电压 U_s 情况下，当耦合阻抗 Z_1 增大时，二次回路的干扰电压 U_r 将下降。耦合阻抗 Z_1 主要是干扰源与被干扰回路间的分布电容 C_1 的容抗。适当合理布置干扰源与被干扰回路的相对位置，可以减小分布电容 C_1 ，可以增加耦合阻抗，从而降低干扰电压 U_r 。

(2) 在二次回路适当地点增加抗干扰电容，如在保护装置的电源入口处及电流、电压互感器二次回路接入保护装置前，可以将式 (2-1) 中的 Z_2 减小。图 4-1 是采用抗干扰电容后的静电干扰的简化电路图，图中 C_1 为漏电容，对应为式 (2-1) 中的 Z_1 ； C_2 为增加的抗干扰电容，其容量一般为几分之一 μF 几十 μF ，等效阻抗为 Z_2 ； C_3 为二次回路与大地间的分布电容。此时加到二次回路上的耦合电压由下式表达。

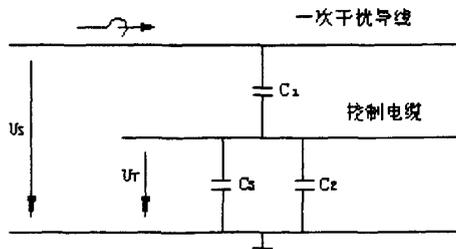


图 4-1 电容对于干扰信号的抑制

$$Z_2' = \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} \quad (4-1)$$

式中 Z_2' 为考虑抗干扰电容后的阻抗，由于一般 C_2 的值比 C_3 值大很多，所

以 Z_2' 与 Z_2 相比将小很多，对照式 (2-1)，干扰电压 U_r 也将下降很多。

采用抗干扰电容不但可以防止静电感应的干扰，对无线电干扰及二次回路内容产生的高频干扰也有很好的抑制作用。但是该抗干扰电容对二次回路也会带来一些副作用，如果容量太大，可能会造成不良后果。图 4-1 可以从一个方面说明抗干扰电容对控制回路的影响。

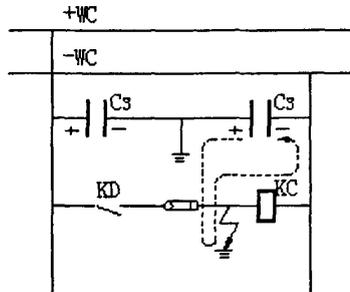


图 4-2 抗干扰电容对二次回路的影响

在图 4-2 电路中，由于直流绝缘监察系统的存在，并假定控制母线的额定电压为 U_e ，正负控制母线对地的绝缘电阻相等，则正常运行时 +WC 对地的电压为 $+50\%U_e$ ，-WC 对地的电压为 $-50\%U_e$ 。可以看出，这时在抗干扰电容上的充电电压为 $50\%U_e$ ，如果在出口继电器 KC 的正电源侧接地，接于负电源侧的抗干扰电容 C，将通过两个接地电沿着虚线对 KC 放电，当 C 的容量足够大并 KC 的动作电压小于 $50\%U_e$ 时，KC 将动作跳闸。这也是规程中要求直接用于跳闸的出口继电器其动作电压不能低于 $50\%U_e$ 的原因。

采用屏蔽电缆并将屏蔽层可靠与地网连接，可以有效抑制静电干扰。使用屏蔽电缆的抗干扰原理可以用图 4-3 来表示。

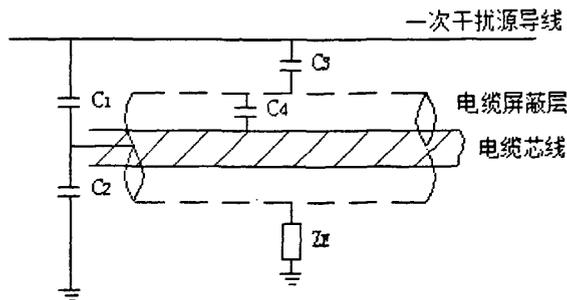


图 4-3 电缆屏蔽的抗干扰图

图 4-3 中由耦合电容 C_1 传递给二次回路的干扰信号被电缆的屏蔽层屏蔽并通过接地点传入地网。

试验表明, 采用屏蔽电缆能将干扰电压降低 95% 以上, 是一种非常有效的抗干扰措施。

当然采用屏蔽电缆的抗干扰效果与屏蔽层使用的材料、制作工艺、接地方式等有关。表 4-1 是在现场试验中测得的各种电缆在操作 500kV 隔离开关时的干扰电压, 试验中采用的平行于 500kV 母线的电缆长度为 80m, 母线长度为 250m。

表 4-1 屏蔽电缆抗干扰效果试验数据

操作方式	最高暂态电压幅值 (p-p, V)				
	塑料无屏蔽电缆	铅包铠装屏蔽	铜丝编织屏蔽	铜带绕包屏蔽	铜钢铝组合屏蔽
单相合闸	5060	170	190	175	163
单相分闸	7800	275	250	280	210
三相合闸	4500	320	490		
三相分闸	9000	340	480		

从上表中可以看出, 在隔离开关操作过程中产生的干扰电压很大, 当使用无屏蔽的塑料电缆时, 其干扰电压最大达 9000V; 当使用屏蔽电缆时, 对干扰电压的抑制效果很好, 其干扰电压的幅值被抑制到 5% 以下; 不同的屏蔽层材料抑制干扰效果很接近。

屏蔽电缆除了对静电干扰有较好的抑制作用外, 对电磁干扰和高频干扰也有很好的抑制作用, 所以屏蔽电缆在变电所二次回路中得到广泛的应用。

(3) 充分利用变电所中的自然屏蔽物, 还可以进一步提高抗静电干扰的效果。在控制电缆敷设的路径上或二次设备的安装现场, 有很多自然的屏蔽物, 例如, 电缆隧道和电缆沟盖板中的钢筋, 各种金属构件, 建筑物中的钢筋等, 都是良好的自然屏蔽物。只要在施工中注意将它们与变电所的接地网连接起来就能形成良好的静电屏蔽。

4.2 防止电磁感应干扰的措施

(1) 减少干扰源与二次回路间的互感减小由于电磁感应在二次回路产生的干扰电压。从式(4-2)可知,互感 M 与控制电缆及一次导线的长度 L 、相互的平行度有关,还受同一回路的两根电缆芯与一次导线的距离之比 b/a 影响,所以在电缆沟道的布置时应尽可能与一次载流导体成直角,减少平行段的长度。从公式(4-3)还可以看出,当 $a = b$ 时,二次回路负载上的干扰电压为零。为此,应尽可能使同一回路的电缆芯安排在一根电缆内,尽量避免同一回路的“+”“-”极电缆芯或电流、电压互感器二次回路中的 ABCN 四芯不在同一电缆内。这是降低感应电压最为有效的措施,并且对任何频率的干扰电压都是有效的。

(2) 电磁干扰需要磁性材料来进行屏蔽。在干扰源与二次环路之间设置电磁屏蔽物,使感应磁通不能进入二次环路,即可消除二次回路的感应电压。工程中常用的措施就是使用带电磁屏蔽的控制电缆,其屏蔽效果与屏蔽层材料的导磁系数、高频时的集肤效应、屏蔽层的电阻等因素有关。屏蔽层采用高导磁材料时,外部磁力线大部分偏移到屏蔽层中,而不与屏蔽层内导线相关链,因而不会在导线上产生感应电势。高导磁材料的屏蔽层对各种频率的外磁场都有屏蔽作用。我们常用的钢带铠装电缆;钢板做成的保护柜,就具有较好的磁屏蔽作用。

(3) 非磁性材料的屏蔽层,其导磁率与空气的导磁率相近,故干扰磁通仍可达到电缆芯线。但在高频干扰磁场的情况下,干扰磁场会在屏蔽层上感应出涡流,建立起反磁通与干扰磁场抵消,使芯线不受影响。此种屏蔽的有效频率与屏蔽层的电导率、厚度和电缆外径成反比,有效频率一般在 10-100kHz 之间。

(4) 在较低频率时,涡流产生反磁通的效应小,因而对外面干扰磁通场的抵御作用也小,为增强对低频干扰磁场的屏蔽,电缆的屏蔽层两端或多点接地,使电缆的屏蔽层与接地网构成闭合回路。干扰磁通在这一闭合回路中感应出的电流可产生反向磁通,减弱干扰磁通对芯线的影响。减少屏蔽层和地环路的阻抗,可增强屏蔽效果。所以,在变电所要敷设 100mm^2 铜排,该铜排最好连接所有屏蔽电缆的两端接地点,这样可以提高屏蔽电缆抗电磁干扰的效果。

4.3 防止地电位差产生干扰的措施

防止电位差干扰对二次回路的影响，首先要确保变电所有一个完善的电网，有条件时可以补充铜排连接，将各点可能产生的电位差降到最低。其次要保证各二次回路对地绝缘良好，确保在地电网产生较大电位差时，不致损坏二次回路绝缘，影响二次回路的正常运行。对于电流、电压互感器的二次回路，要求严格按照一个电气连接中只能有一个接地点。如果一个电气回路中存在两个接地点，电位差产生的地网电流会穿入该回路，影响保护的正确动作。

4.4 本章小结

为了进一步降低干扰信号信号进入保护装置的可能性，除了上章中讲到的装置本身采取措施之外，还需要在外回路即二次回路中采用专门措施进行抗干扰，主要有：

- 控制电缆采用屏蔽电缆且对于进入控制室或保护室的电缆屏蔽层需要进行两端接地
- 保护装置用直流电源在保护装置入口处经抗干扰电容吸收高频干扰信号
- 正确选择合理的二次电缆敷设方式和路线，尽量远离高频信号的入地点
- 敷设专用的铜排接地网，减少地网的接地电阻，以防止地电位升造成的干扰

第 5 章 微机保护装置的抗干扰

微机保护装置的抗干扰应保证具有一定的抗扰度，在选型时应当尽量选择抗扰度高的微机保护装置。微机保护的抗扰度主要指装置的各端口能承受的干扰级别，这些端口包括电源端口、输入端口、输出端口、通信端口、外壳端口和功能接地端口等。一般考虑端口的传导干扰、快速瞬变、1MHz 脉冲群、浪涌、静电放电、直流中断和工频干扰等的抗扰度要求，这些抗扰度要求均是对应前述的各种干扰类型的。

5.1 微机保护装置的接地介绍

5.1.1 继电保护装置系统接地状况介绍

接地是提高电子电气设备电磁兼容性有效的重要手段之一。正确的接地既能抑制外部电磁干扰的影响，又能防止电子电气设备向外部发射电磁波；而错误的接地常常会引入非常严重的干扰，甚至会使电子电气设备无法正常工作。尤其是成套控制设备和自动化控制系统，因为有多种控制装置分散布置在许多地方，所以它们各自的接地往往会形成十分复杂的接地网络，不仅需要在系统设计时周密考虑，而且在安装调试时也要仔细检查和做适当的调整。“地线”是对接地的实施，即按一定的要求，用必要的金属导体或导线把电路中的某些“地”电位点连接起来，或是将电子电气设备的某一部位(如:外壳)和大地连接起来。狭义上讲，“接地”-即与地球保持“同电位”；广义上讲，“接地”-是电路系统中的“等电位点或等电位面”，它是电路系统的基准电位，但不一定为大地电位。

一、 电气设备接地的作用及分类

● 电子电气设备接地的作用

电子电气设备接地的目的有二，一是处于安全的考虑，二是为了抑制外部的干扰。

✓ 安全的考虑

以确保人员和设备的安全为目的的接地称为“保护接地”它们必须可靠地接在大地电位上。一般地说，电子电气设备的金属外壳、底盘、机座都要可靠接地。

✓ 抑制外部干扰的考虑

电子电气设备的某些部位与大地相连可以起到抑制外部干扰的作用,例如静电屏蔽层接地可以抑制变化电场的干扰,电磁屏蔽用的导线原则上可以不接地。但不接地的屏蔽导线时常会带来静电耦合而产生所谓的“静电屏蔽”效应,所以仍需要接地为宜。电源端多安有滤波电路或滤波器,其接地性能直接影响其滤波性能。

● 电子电气设备接地的分类

一般地说,电子电气设备有许多需要接地的部位,由于电路的性质和接地的目的不同,必须加以严格区分,需要分成若干独立的子系统,然后连接在一起进行总接地。从接地的性质看,把接地分为三大类:

(1) 保护安全接地

电子电气设备的金属外壳、底盘、机座用良好的导体与大地连接成等电位,称为保护接地,它对电子电气设备的安全运行和维护人员的生命安全起到十分重要的作用。

(2) EMC 接地

EMC 接地具有其自身特有的要求:

- ✓ 屏蔽接地: 为了抑制变化的电磁场的干扰而采用的多种屏蔽层、屏蔽体,都必须良好地接地,才能起到良好的屏蔽作用。
- ✓ 滤波器接地: 滤波器,尤其是电源滤波器,必须以本地地为参考,以尽可能达到所设计的滤波作用。

(3) 系统地: 即电路参考地

要使电子电气设备能正常地运行和稳定可靠地工作,也必须处理好等电位点的接地问题,这类接地称之为系统接地。对于系统接地来说,由于其工作性质和用途的不同,又可分为:信号地、模拟地、数字地、电源地、计算机地、负荷地、外设地等。

二、 接地的方式

地线设计是一项重要的设计，也是难度较大的一项设计。在 EMC 设计的初期就进行地线设计是解决 EMC 问题的最有效、最廉价的方法。下面对三大类接地方式分别进行详尽讨论。

● 保护接地

接地作为一种措施，起源于强电技术，由于强电电压高、容量大，容易危及人身和设备的安全。因此，从安全的角度考虑，电气设备的金属外壳、底盘、机座都应与大地良好地连接成等电位，从而在故障状态下保证人身和设备的安全。电气设备的保护接地有两种方式：

(1) 保护接零

三相四线制供电系统中的中性线即为保护接零线，它是电路环路的重要组成部分。

(2) 保护接地

除零线以外，另外配备一根保护接地线，它与电子电气设备的金属外壳、底盘、机座等金属部件相连，一般情况下，保护接地线是没有电流流动的，即使有电流流动也是非常小量的漏电流，所以说，在一般情况下，保护接地线上是没有电压降的，与之相连的电子电气设备的金属外壳都呈现地电位，保证了人身和设备的安全。

出于上述目的，各国都对保护接地作了必要的规定。例如美国国家电气委员会在电气法中规定了交流电源的输配电标准，该标准规定了室内 115V 交流配线为三线制，如图 5-1 所示。火线上串有熔丝，负载电流经火线至负载，再由中线返回。另备有一根保护接地线，该线与设备的金属外壳、底盘等金属部件相连，当发生故障时，例如负载的绝缘被击穿损坏，保护接地线上瞬间将有大大电流流过，电路中的熔丝或断路器由于大电流流过将很快把电路切断，从而保证了人身和设备的安全。

我国的三相四线制配电系统与美国的类似，如图 5-2 所示，只是电压不同而已。

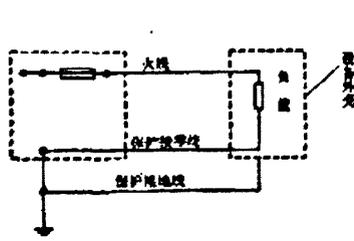


图 5-1 单相三线制接线图

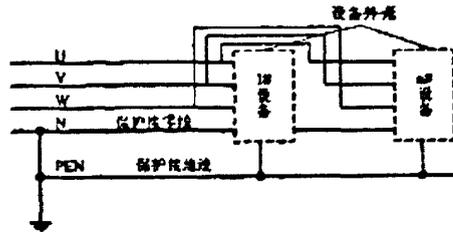


图 5-2 三相四线制接线图

● 系统接地

除了上面介绍的从安全角度出发而考虑的保护接地外，为了保证电子电气设备正常、稳定和可靠的运行，还必须处理好设备内部系统中各个电路工作的参考电位，这类基准参考电位的连接线称为“系统接地线”。在电子电气设备控制系统中遇到的大量和经常需要解决的主要接地问题就是系统接地。

系统接地线既是各电路中的静态、动态电流通路，又是各级电路通过共同的接地阻抗而相互耦合的途径，从而形成电路间相互干扰的薄弱环节。可以肯定地讲，电子电气设备中的一切抗干扰措施，几乎都无一例外的与接地有关。因此，正确的接地是抑制噪声和防止干扰的主要途径，它不仅能保证电子电气设备正常、稳定和可靠地工作，而且能提高电路的工作精度。反之，不正确的接地，会降低电路的工作精度，严重时还会导致电子电路无法正常工作，陷入系统瘫痪的境地。

电子电气设备中的系统接地是否要接大地和如何接大地，与系统的工作稳定性有着极其密切的关系，这是电子电气设备接地系统技术中的重要议题。电子电气设备的系统接地方式有三种：

(1) 浮空地

“浮空”就是不接大地，任其悬浮的一种方式，它的实质是使电路的某一部分与“大地线”完全隔离，从而抑制来自接地线的干扰。由于没有电气上的联系，因而也就不可能形成地环路电流而产生地阻抗的藕合干扰。图 5-3 及图 5-4 是两种浮空地。浮空地方式具有这一主要优点，但也有其不足之处。

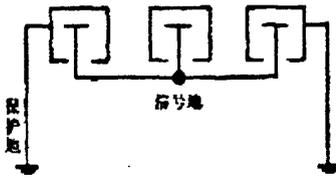


图 5-3 设备悬浮地

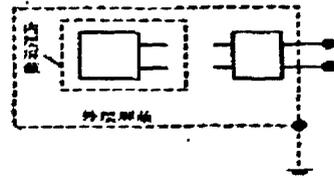


图 5-4 单元悬浮地

研究成果表明，一个较大的电子电气控制设备，由于存在较大的对地分布电容，它的基准电位将会受电磁场的干扰(通过分布电容)，使得电路产生位移电流，而难以正常工作。在电子电气控制设备的工作速度提高、感应增大、输入输出增多或加长的情况下，其对地分布电容就会增大，继而加大位移干扰电流。另外，由于分布电容的存在，容易产生静电积累和静电放电，在雷电情况下，

还会在机箱和单元之间产生飞弧，甚至使操作人员遭到电击。所以对于比较复杂的电磁环境，“浮地方式”是不太适宜的。图 5-5 所示电路中分布电容 C ，在外界干扰的作用下会产生干扰电势

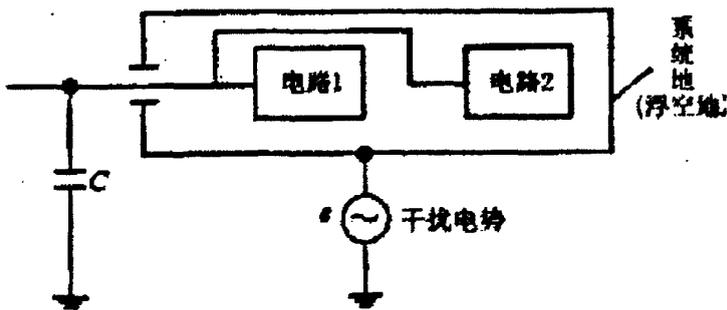


图 5-5 分布电容引起干扰电势原理图

(2) 系统地直接接大地

这种接地方式的优缺点恰好与“浮空地”方式相反，当电子电气控制设备的分布电容较大时，宜采用直接接大地方式，但要注意选择接地点的位置及其接地点的多少，只要合理选择，便能把干扰降低到最低程度。

(3) 电容接地方式

经电容把系统地与大地连接起来，接地电容多为高频电容，它提供对“系统地”至“大地”高频干扰分量的通路，相当于一个高通滤波器，从而抑制了由对地分布电容所造成的影响。这种接地方式只适合于低频系统，所用电容应具有良好的高频特性和足够的耐压值，电容量一般 $2\mu\text{F}$ – $10\mu\text{F}$ 。

● 系统地接地的原则

(1) 低频电路的接地原则

低频电路的接地，应坚持一点接地的原则，而在一点接地的原则中，又有串联和并联之区别。

如图 5-6 所示。

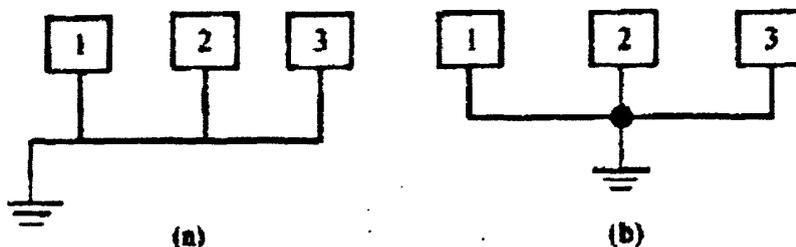


图 5-6 一点接地 (a) 串联接地 (b) 并联接地

一点接地是为许多接在一起的电路提供共同参考点的方法，并联一点接地最为简单而实用，它没有公共阻抗耦合和低频地环路的问题。每一个电路模块都接到一个单点地上，每一个子单元在同

一点与参考点相连。地线上其它部分的电流不会耦合进电路。这种接地方式在 1MHz 以下的工作频率下能工作得很好。但是，随着频率的升高，接地阻抗随之增大，电路上会产生较大的共模电压。所以，一点接地不适合于高频电路。

(2) 高频电路的接地原则

对于工作频率较高的电路和数字电路，由于各元器件的引线和电路的布局本身的电感都将增加接地线的阻抗，因而在低频电路中广泛采用一点接地的方法，若用在高频电路容易增加接地线的阻抗，而且地线间的杂散电感和分布电容也会造成电路间的相互耦合，从而使电路工作不稳定。为了降低接地线阻抗及其减少

地线间的杂散电感和分布电容造成电路间的相互耦合，高频电路采用就近

接地—即“多点接地”的原则，把各电路的系统地线就近接至低阻抗地线上，如图 5-7 所示。一般来说，当电路的工作频率高于 10MHz 时，应采用多点接地的方式。由于高频电路的接地关键是尽量减少接地线的杂散电感和分布电容，所以在接地的实施方法上与低频电路有很大的区别。

(3) 整机系统的混合接地原则

混合接地既包含了单点接地的特性，又包含了多点接地的特性。例如，系统内的低频部分需要单点接地，而高频部分需要多点接地。图 5-8 是某一电子电气设备的混合接地，把设备的地线分成三大类：电源地、信号地、屏蔽地。所有的电源地线都接到电源总地线上，所有的信号地线都接到信号总地线上，所有的屏蔽地线都接到屏蔽总地线上，三根总地线最后汇总到公共的参考地。

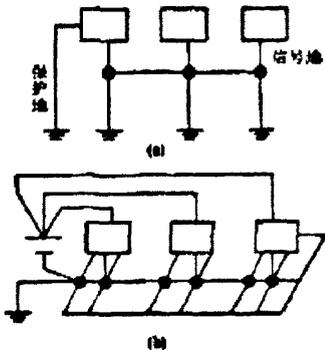


图 5-7 多点接地系统

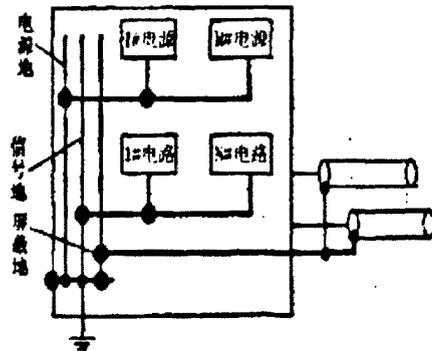


图 5-8 电子电气设备的混合接地

(a) 设备多点接地 (b) 单元多点接地

5.1.2 装置具体接地状况介绍

依据上述电气装置的接地情况，下面就介绍一下保护装置的接地情况。

- ✓ 安全保护接地: 外壳接地
- ✓ 系统接地: 内部浮地
- ✓ EMC 接地: 如图 5-9 (a) (b) (c) (d) 所示，除屏蔽互感器屏蔽接地外，其他接到外壳地上的器件多为抑制共模干扰的对地电容器件。

1. 采集部分 (CT 和 PT):

微机继电保护数据采集系统包括电压形成、模拟滤波、模/数转换等模块。其中电压形成单元由辅助电流变换器、电压变换器等构成,将变电站中电流互感器(CT)、电压互感器(PT)的二次电流、电压、输出转化为计算机能够识别的弱电信号;模拟滤波单元,包括有源滤波和无源滤波两种;模/数转换单元,包括基于压频转换的 VFC 的 A/D 器件和基于逐次逼近式 A/D 器件。

从电磁兼容角度分析来看,电压形成单元构成了微机保护的交流输入端口。辅助电流、电压变换器起到屏蔽和隔离作用,可提高微机保护的可靠性。因此,本论文在试验环节,将偏重于不同接地导线对于辅助电流、电压变换器的屏蔽隔离作用影响而导致装置整体电磁兼容性性能变化的情况观察与分析。

2. 电源部分:

现在微机继电保护装置都是采用开关电源,一般采用直流 220V/110V 供电,输出有+5V, +/-15V(12V), +24V,且各自的参考地相互独立,具有对地电容。另外,开关电源内部一般有集成滤波电路,同时装设有电压保护器件(如气体放电管、金属氧化物压敏电阻、抑制二极管 TVs 等)。这些对地电容以及各种保护器件都接到外壳接地端子上。

3. 开入、开出部分:

微机继电保护装置中的开关量输入回路大多采用光电隔离器件或者继电器(继电器现在已经很少使用)。所以国内的开入量输入可设计为采用 24V 电源供电,利用光耦器件转换为 5V 信号,如图 5-9(c)。开入量一般直接进入 CPU 插件上。如果存在屏间的空接点引线,先经过一级光耦器件将 220V/110V 强电输入,转化为 24V 输入,再经过图 5-9(c)光耦回路,转换为 5V 信号。

保护装置的开出量一般是继电器的空接点,包括控制接点及信号接点,采用 220/110V 强电电源。计算机的+5V 开出量输出通过光耦器件转换为 24V 信号,经功率三极管驱动继电器。

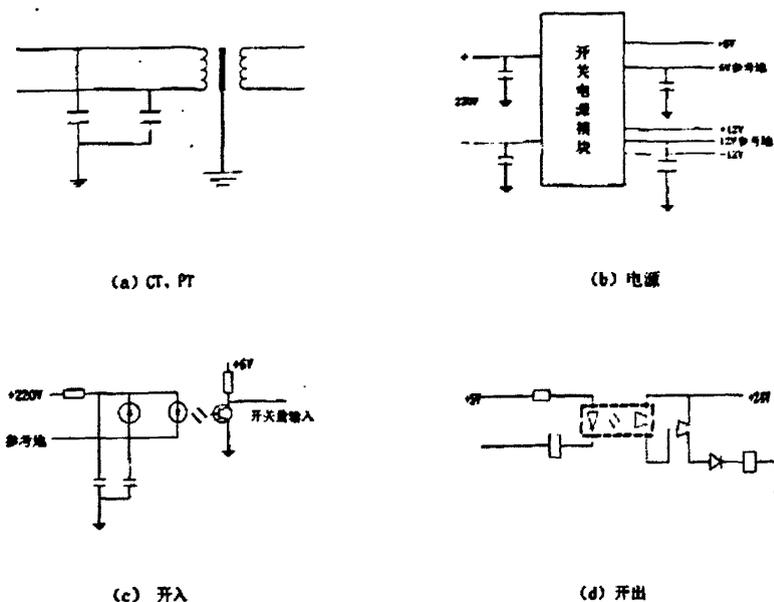


图 5-9 本文所用装置系统接地形式

由以上对装置接地系统的分析，可以知道，连接到设备的接地线部分主要有屏蔽接地、各端口及系统内部参考地为抑制共模干扰的电容接地(包括电源模块的滤波接地)。从而可以看出，接地导线不同时将会影响装置各种抑制措施的抑制效能，从而影响保护装置整体的电磁兼容效能。

5.2 微机保护装置对暂态干扰的抑制

前章已经详细的论述了一般电子装置的接地状况，也明确提出了本文的重点放在由于接地阻抗因素影响到所采用的各种 EMC 措施，进而影响整个装置的抗扰能力方面。所以有必要了解一般的电子装置较为常用的各种 EMC 措施以及各种措施抑制效能与接地效能之间的关系。

5.2.1 屏蔽互感器

继电保护装置在交流板入口一般都采用屏蔽互感器，使进入装置的干扰信号达到最小。屏蔽又分为电屏蔽与磁屏蔽。

在讨论电屏蔽时，涉及到屏蔽体的接地问题。电屏蔽的实质是减小两个回路(或两个元件、组件)间电场感应的影。电屏蔽体利用良导体制成，既可阻止屏蔽体内腔干扰源产生的电力线泄漏到外部去，也可阻止屏蔽体外的电力线进入到

屏蔽体内腔。

在电子系统和电子装置中所涉及的电场，一般均是随时间变化的，称之为“时变场”。随着电场的变化，屏蔽体的接地线就必然有电流通过。对屏蔽机理的分析，采用电路理论较为方便，这时干扰源与感受器之间的电场感应可用两者间分布电容的藕合来度量。

干扰源 A 所产生的电力线对导体 B 的作用，可认为是通过两者间的分布电容藕合引起的，如图 5-10 所示。设 A 的电位是 U_A ，则感受器 B 的感应电压为

$$U_B = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_A \quad (5-1)$$

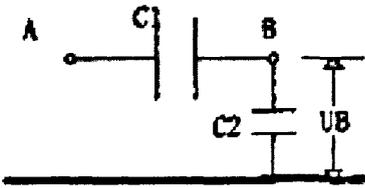


图 5-10 无屏蔽时导体 B 由于感

应产生的电压

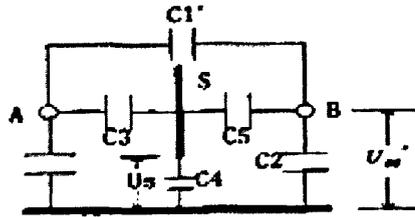


图 5-11 A、B 间加入金属板

由 5-1 式可知：欲减小 U_B ，可增大 C_2 。因此在电子装置中对一些敏感导线或元件应贴近金属板或地线布置；另一方面应减小 C_1 ，可在布局上使干扰源和感受器应尽可能远离。当采取上述措施均不能满足要求时，则需要采用屏蔽来解决。

为了减小 A 对 B 的干扰，可在 A、B 间加入一块金属屏蔽板 S。首先假定金属板 S 不接地，此时相互间的分布电容如图 5-11 所示。为分析方便，忽略 A、B 间的剩余电容 C_3 ，则感受器 B 上的感应电压 U_B 仅与屏蔽金属板上的感应电压 U_S 有关，即

$$U_{BS} = \frac{C_5}{C_2 + C_5} U_S \quad (5-2)$$

$$\text{而 } U_S = \frac{C_1}{C_3 + C_4 + C_1 C_3 / (C_2 + C_5)} U_A \quad (5-3)$$

将式 5-3 代入式 5-2，则

$$U_s' = \frac{C_1 C_3}{[C_1 + C_4 + C_2 C_3 / (C_2 + C_3)](C_2 + C_3)} U_A \quad (5-4)$$

由式(5-4)可知,在A,B间加入屏蔽金属板S以后,B的感应电压 U_{bs}' 在下述情况下可能比无屏蔽时更大。当屏蔽体离地较远,使 $C_3 \ll C_4$;若还有 $C_3 \ll C_2 C_5 / (C_2 + C_5)$,则

$$U_{bs}' = \frac{C_5}{C_2 + C_5} U_A \quad (5-5)$$

因为屏蔽体与感受器B间的分布电容远大于A,B间原有的分布电容,即 $C_5 > C_1$,所以 $U_{bs}' > U_{bs}$ 。

可见此屏蔽体不仅没有屏蔽作用,反而加强了干扰源A和感受器B的耦合。如果把金属屏蔽良好接地,就可以认为 $C_4=0$, $U_s=0$ 。因此 $U_{bs}=0$,即获得良好的屏蔽效能。

实际上由于金属屏蔽板不是无限大,或者并非完全无缝隙的封闭体,则A,B间总还存在剩余电容 C_1' ,由于 C_1' 的作用,屏蔽后在B上的感应电压 U_{bs} 为

$$U_{bs} = \frac{C_1'}{C_1 + C_2 + C_3} U_A \approx \frac{C_1'}{C_1 + C_3} U_A \quad (5-6)$$

但是屏蔽体接地时总有接地阻抗存在,有时屏蔽体是通过导线接地的,接地阻抗还与频率有关。

当屏蔽体接地线在时变场作用下流过地电流时,接地阻抗 Z_S 上有压降,使屏蔽体的电位 U_{bs} 不为零,并随着 Z_S 的上升而增加感受器B上的感应电压 U_{bs} 又随 U_s 增加,结果使屏蔽效能下降。

5.2.2 滤波器

滤波技术是抑制电气、电子装置传导干扰的常用手段之一,也是提高电子装置抗传导干扰能力的重要措施。滤波器的作用是允许工作信号通过,而对非工作信号(电磁骚扰)有很大的衰减作用,使产生干扰的机会减小。电磁干扰(EMI)滤波器属于低通滤波器,包括电源线滤波器、信号线滤波器等。

工频滤波器的工作原理与普通滤波器一样,它能允许有用信号的频率分量通

过，同时又阻止其他干扰频率分量通过。其工作方式有两种：一种是把无用信号能量在淹波器里消耗掉，这种淹波器中含有损耗性器件，如电阻或铁氧体等。另一种是反射式滤波器，通常由电抗元件，如电感器和电容器组合而成，使在滤波器的通带内提供低的串联阻抗和高的并联阻抗，而在阻带范围内则相反。

其中抑制共模干扰主要靠对地电容的旁路干扰中存在的高频分量，从而起到抑制目的。因此滤波器的接地好坏则直接影响滤波器的性能。另外，为了避免高频干扰的感应，滤波器通常使用金属材料进行屏蔽，由上面的论述可知，屏蔽效能的好坏与接地效能的好坏有直接关系。

5.2.3 抑制瞬变骚扰的常用器件

由于滤波器的特性阻抗与电网以及负载阻抗难以达到完全匹配，使得滤波器对瞬变骚扰的抑制能力变得非常有限。目前对付瞬变骚扰的最有效办法是采用瞬变骚扰吸收器。常用的瞬变骚扰吸收器件有铁氧体、压敏电阻、瞬态抑制二极管和气体放电管。

● 铁氧体

铁氧体是一种立方晶格结构的亚铁磁性材料，在阻带内，有耗器件将电磁骚扰的能量吸收后转化为热损耗，而起到滤波作用。理论上讲，理想的铁氧体能在高频段提供高阻抗，而在其他频段上提供零阻抗。但实际上，铁氧体的阻抗是依赖于频率的，在频率低于 1MHz 时，其阻抗最低，对于不同的阻抗，最高的阻抗出现在 100-500MHz 之间。所以可以用来很好的吸收电快速瞬变干扰能量。需要注意的一个问题是铁氧体会发生饱和，所以在选择铁氧体时，在使用空间允许的条件下，选择尽量长、尽量厚和内孔尽量小的铁氧体器件。

● 压敏电阻

当压敏电阻上的电压超过一定幅度时，电阻的阻值降低，从而可将浪涌能量泄放掉，并将浪涌电压的幅度限制在一定的幅度。其特点是峰值电流承受能力较大，价格低。缺点是钳位电压较高（相对于工作电压），随着受到浪涌冲击次数的增加，漏电流增加，响应时间较长，寄生电容较大。

● 瞬态抑制二极管 (TVS)

当 TVS 上的电压超过一定的幅度时器件迅速导通，从而将浪涌能量泄放掉，并将浪涌电压幅值限制在一定的幅度。其特点是响应时间短，钳位电压低(相对于工作电压)。缺点是承受峰值电流较小，一般器件的寄生电容较大，如在高速数据线上使用则要用特制的低电容器件。

● 气体放电管

当放电管上的电压超过一定幅度时，器件变为短路状态，从而可将浪涌能量泄放掉。其特点是承受电流大，寄生电容小。缺点是响应时间长，由于导通维持电压很低，因此会有跟随电流，不能在直流环境中使用(放电管不能断开)。另外在交流中使用时也要引起注意(跟随电流会超过期间的额定功率值)，可以在泄放回路中串联一个电阻来限制电流幅度。放电管的寿命约为 50 次，随后导通电压开始下降。

由以上各种采用的电磁干扰抑制措施中，共同的特点就是在干扰进入装置之前就把干扰屏蔽或泄放到大地上，而接地好坏则明显与屏蔽或泄放效能有直接关系，由此可以推断不同的接地导线会引起装置不同的反应，从而也决定了后续章节的论文内容及任务。

5.3 微机保护软件抗干扰

微机保护装置工作环境恶劣，其抗干扰性能的好坏对自身的稳定运行至关重要。软件抗干扰措施较多，其中包括数字滤波、软件容错、数据冗余、软件狗、指令复执、多重动作等。实践证明，这些软件抗干扰措施对提高微机保护装置的稳定运行有很大的帮助。

5.3.1 软件抗干扰特点

抗干扰的方法有硬件抗干扰和软件抗干扰两种。硬件抗干扰发展的历史较长，理论和实践比较成熟，主要抗干扰技术有各种接地处理、屏蔽和隔离、滤波、去耦、旁路等。硬件抗干扰抑制和消除了大部分的干扰，但完全依靠硬件电路来消除所有的干扰是不可能的。软件抗干扰发展较晚，目前还没有形成较完善的理论。但是，利用微机的记忆、快速计算和逻辑判断功能，从软件方面进行干扰抑制和消除的研究，已逐渐受到人们重视。

所谓软件抗干扰,就是利用微机的高速运算和处理功能,采取程序的手段来检测并进而排除电磁干扰等对微机控制系统的影响。软件抗干扰的本质是:在有干扰存在的情况下利用编程技术来抵消其影响。即当干扰使微机控制系统出现一定的运行性故障时,能够依靠系统内驻的能力(程序)保持系统连续正确地执行

其程序和输入输出的功能。因此,软件抗干扰过程实质是一个干扰容错过程,是容错技术在软件设计中的具体体现。应用软件抗干扰的前提是干扰尚未引起硬件的破坏, RAM 中程序和数据尚未丢失,否则软件抗干扰无从谈起。

软件抗干扰有许多优点,它可以根据信号和环境的不同,选用不同的抗干扰方法,而无须改变硬件结构,因而灵活多变,功能强大,可以解决硬件所不能解决的一些问题,同时有利于节省硬件开销。但软件抗干扰是被动的,本质在于“抗”,而不在于“拒”;此外,它抗持续强干扰的效果并不理想。硬件抗干扰在于“拒”,即把干扰“拒”于系统之外,使系统免受干扰的影响,达到稳定运行的目的。但是,硬件抗干扰措施无论如何完善,彻底消除干扰是不可能的,只有采用硬件和软件相结合的办法,取长补短,才能取得最佳的抗干扰效果。

5.3.2 微机保护装置常见干扰及干扰对系统软件的影响

● 常见干扰

微机保护装置的干扰来源比较复杂,有来自设备内部的,也有来自设备外部的。主要有下面几类:

- ✓ 供电系统干扰,其中电源噪声是微机系统中最重要的干扰来源,并且危害最严重。
- ✓ 静电感应和电磁感应干扰,通过电磁波辐射窜入系统。
- ✓ 信号通道干扰,通过与主机相连的输入输出通道进入系统。

● 干扰对系统软件的影响

干扰进入微机保护装置,使得保护装置不能正常工作,导致控制失灵,可能造成重大的事故。其对系统软件的影响主要表现如下:

- ✓ 降低数据采集的可靠性。干扰侵入微机保护系统的输入通道并叠加在信

号上; 致使数据采集误差加大。

- ✓ 降低控制的灵敏性。输出接口受到干扰, 使得输出信号混乱, 导致控制输出误差加大, 甚至失灵。
- ✓ 数据出错。微机保护系统中, RAM 是可读写的, 在干扰的侵害下, RAM 中的数据可能被修改, 造成数据出错。
- ✓ 程序运行失常。微机保护系统受强干扰后, 程序计数器 PC 值可能被改变, 会破坏程序的正常运行。

● 常用软件抗干扰措施

针对干扰对系统软件的影响, 现从抑制和消除数据采集误差、控制失灵、数据出错、程序跑飞等四个方面给出常用的软件抗干扰措施。

1. 数据采集误差的软件抗干扰措施

数据采集误差的软件抗干扰措施主要是数字滤波。数字滤波实质上是一种程序滤波, 即通过一定的计算程序, 对采样信号进行平滑加工, 减少干扰在有用信号中的比重。常用的数字滤波法有均值滤波法、一阶递推数字滤波法、比较取舍法、中值滤波法等。

(1) 均值滤波法

均值滤波法有算术平均值滤波法和加权平滑滤波法。算术平均值滤波法就是对一点的数据连续采样 N 次, 计算其平均值, 以平均值作为该点的采样结果。其算法公式如下:

$$\bar{X} = \frac{1}{N}(X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_N) \quad (5-7)$$

由式(5-7)可见, X 的精度取决于检测次数 N , N 值越大精度越高。但 N 值的增大会增加存储空间和运算时间的开销, 一般情况 N 取值为 4-20。实际应用中一般采用加权平滑滤波法, 其算法公式如下:

$$\bar{X}_N = \frac{X_N + X_{N-1}}{2} = \frac{X_N}{2} + \frac{X_{N-1}}{4} + \frac{X_{N-2}}{8} + \frac{X_{N-3}}{16} + \dots \quad (5-8)$$

由式(5-8)可见,当前采样值与历史采样值相联系,有利于削弱瞬态干扰的影响,且具有运算速度快,占有存储空间小的特点。

(2) 一阶递推数字滤波法

一阶递推数字滤波法是利用软件完成 RC 低通滤波器的算法,实现用软件方法来代替硬件 RC 低通滤波器。其算法公式如下:

$$Y_N = e^{-TA} Y_{N-1} + (1 - e^{-TA}) X_N \quad (5-9)$$

其中 Y_N 、 Y_{N-1} 分别为第 N 、 $N-1$ 次的滤波计算值, X 为第 N 次的采样值, T 为采样周期, T 为滤波器的时间常数, T 的大小根据干扰信号的频率来选取。

(3) 中值滤波法和比较取舍法

中值滤波法是对一个采样点连续采样 N 次(一般 N 取奇数),将 N 个采样值按大小顺序排列,取中间值为本次采样值。中值滤波法能有效地克服偶然因素引起的波动或采样器不稳定引起的误码等脉冲干扰。

比较取舍法又称限副滤波法,其算法公式如下:

$$X_N = X_{N-1} \text{ 当 } |X_N - X_{N-1}| \leq \Delta X, X_N = X_N \text{ 当 } |X_N - X_{N-1}| > \Delta X \quad (5-10)$$

其中 ΔX 为由被测对象实际情况决定的两次采样允许的最大差值, X_N 、 X_{N-1} , 为第 N 、 $N-1$ 次的采样值。当采样的个别数据存在偏差时,为了剔除这些错误数据,可采用比较取舍法。

2. 控制失灵的软件抗干扰措施

控制失灵软件抗干扰措施主要是为了克服干扰对开关量读入和动作信号输出的影响,常用的方法为:

(1) 指令复执

指令复执指对于重要的指令,特别是输入/输出指令,要重复执行,以确保其正确。开关量的读入必须两次以上读入一致才有效;若是按键类开关,还应加软件除抖保护,即加软件延时,延时值一般 20ms 左右。动作信号输出时,需将

输出回读，以保证输出信号的正确性。对于微机保护装置，应不断重复该输出命令，确保动作无误。只要有可能，重复周期应尽可能短，这样当外部设备接收到一个被干扰的错误信息后，还来不及做出有效的反应，一个正确的输出又来到，就可及时防止错误动作的产生。

(2) 多重动作指令

保护出口驱动电路的控制不要由单条指令实现，而要分成两条或多条指令的组合来执行，否则对该控制指令的任何干扰都有可能引起误动作。

(3) 设置当前输出状态寄存单元。当干扰侵入输出通道造成输出状态破坏时，系统可以及时查询当前输出状态寄存单元的输状态信息，及时纠正错误的输出状态。

3. 数据出错的软件抗干扰措施

数据出错的软件抗干扰措施主要是针对 RAM 中的数据进行保护。通常采用数据冗余技术，将同样的数据在不同的地方保存 1~2 个备份。当使用 RAM 中数据时，把原数据与备份数据进行比较，相同则认为数据未被破坏，否则启动备份数据。值得注意的是，备份数据的存放地址应与原数据保持一定的距离，以防止两者同时被破坏。同时应注意数据区不要靠近堆栈，以防止堆栈溢出破坏数据或读写数据破坏堆栈。

可见，RAM 中数据的保护是以牺牲存储空间和执行速度为代价的。在实际应用中，一般只对 RAM 中极少数重要的不允许丢失的数据进行保护，而绝大部分临时存放、随时更新的数据即使遭到破坏，最多也只是造成系统短时间的波动。

4. 程序跑飞的软件抗干扰措施

程序跑飞的软件抗干扰措施主要有“软件狗”、“指令冗余”和“软件陷阱”，下面逐一介绍。

(1) 软件狗

软件狗实际上是一个软件监视系统，通常利用软

件定时器或硬件定时器的中断，在中断程序中查询某个设定的标志，若标志不为零，则清零或减 1 后退出；若标志为零，则执行复位指令或转向出错处理程

序, 在出错处理程序中完成各种善后工作, 再使系统复位。在系统程序中根据要求的监视时间的长短去设置标志, 一旦程序未能在给定的时间内重置标志, 就会导致系统复位。软件狗对不带硬件狗电路而有定时器中断的微机系统特别有用, 其缺点是额外占用了—个定时器。

(2) 指令冗余

指令冗余指在一些对程序流向起着决定作用的指令(如跳转指令)及对系统工作状态至关重要的指令(如中断指令)前面, 人为地插入几条空操作指令, 以保证跑飞的程序能重返正常轨道。指令冗余得以实现的前提是程序跑飞到程序区并执行了空操作, 否则指令冗余不起作用。应当注意的是在一个程序中“指令冗余”不要使用过多, 以免降低程序的执行效率。

(3) 软件陷阱

软件陷阱是指在非用户程序区(如未使用的E²PROM区、未使用的中断向量区、数据表格区的周围)填充空操作指令并周期性写入一条指引指令, 当程序跑飞到这些区域时, 强行将程序引向一个指定的地址, 在那里有一段专门对程序出错处理的程序, 以便引导程序进入正常的运行状态。

5.4 其他抗干扰措施及其在工程实践中的应用

为了保障人身和设备的安全以及满足继电保护和—控制设备对电磁兼容的要求, 通常将设备的外壳以及二次回路电缆的屏蔽层接地, 要求在发电厂、变电站控制室内建立起等电位电网, 以便很好地与厂、站共公接地网直接连接。改善继电保护及二次回路使用场所的地网, 按GB/T14285-2006《继电保护和—安全自动装置技术规程》等要求进行装置、电缆屏蔽层等接地, 能有效降低干扰。

5.4.1 工程实践中常用的抗干扰措施

(1) 装设静态保护和—控制装置的柜柜地面下宜用截面不小于100mm²的接地铜排直接连接构成等电位接地母线。接地母线应首末可靠连接成环网, 并用截面不小于50mm²、不少于4根铜排与厂、站的接地网直接连接。

(2) 静态保护和—控制装置的柜柜下部应设有截面不小于100mm²的接地铜排。

柜柜上装置的接地端子应用截面不小于 4mm^2 的多股铜线和接地铜排相连。接地铜排应用截面不小于 50mm^2 的铜排与地面下的等电位接地母线相连。

(3) 对用于微机保护电压、电流和信号接点的引入线,应采用屏蔽电缆,屏蔽层在开关站与控制室同时接地,不允许用电缆芯两端同时接地的方法作为抗干扰措施。利用电缆的屏蔽作用减缓电磁干扰,在控制室内电缆屏蔽层宜在保护柜上接于柜柜内的接地铜排;在开关场电缆屏蔽层应在与高压设备有一定距离的端子箱接地。互感器每相二次回路经屏蔽电缆从高压箱体引至端子箱,该电缆屏蔽层在高压箱体和端子箱两端接地。对于双层屏蔽电缆,内屏蔽应一端接地,外屏蔽应两端接地;电缆屏蔽层最好不要接在保护柜(柜)上的接地铜排上。

(4) 高频同轴电缆应在两端分别接地,并紧靠高频同轴电缆敷设截面不小于 100mm^2 的铜排。如变电站内有多回高频电缆,则应在控制室电缆走廊和主电缆沟视情况敷设一或二根公共 100mm^2 铜导线,并在分支电缆沟敷设一根同样粗细的铜导线(铜排),公共铜导线(铜排)与分支铜导线(铜排)的接触电阻要小,宜烧铜焊联接。同时要求将设在开关站的高频结合滤波器的接地点和高频保护收发信机的接地点都直接接到 100mm^2 铜导线(铜排)上,以保证铜导线(铜排)对高频电缆屏蔽层的可靠短路。高频通道各连接处(结合滤波器与耦合电容器引下线除外)必须用铜螺丝固定。

(5) 传送音频信号应采用屏蔽双绞线,其屏蔽层在两端接地;传送数字信号的保护与通信设备间的距离大于 50m 时,应采用光缆;对于低频、低电平模拟信号的电缆,如热电偶用电缆,屏蔽层必须在最不平衡端或电路本身接地处一点接地。

(6) 柜柜内的交流供电电源(照明、打印机和调制解调器)的中性线(零线)不应接入柜柜内等电位接地网。

具体实施如图 6-1 所示。

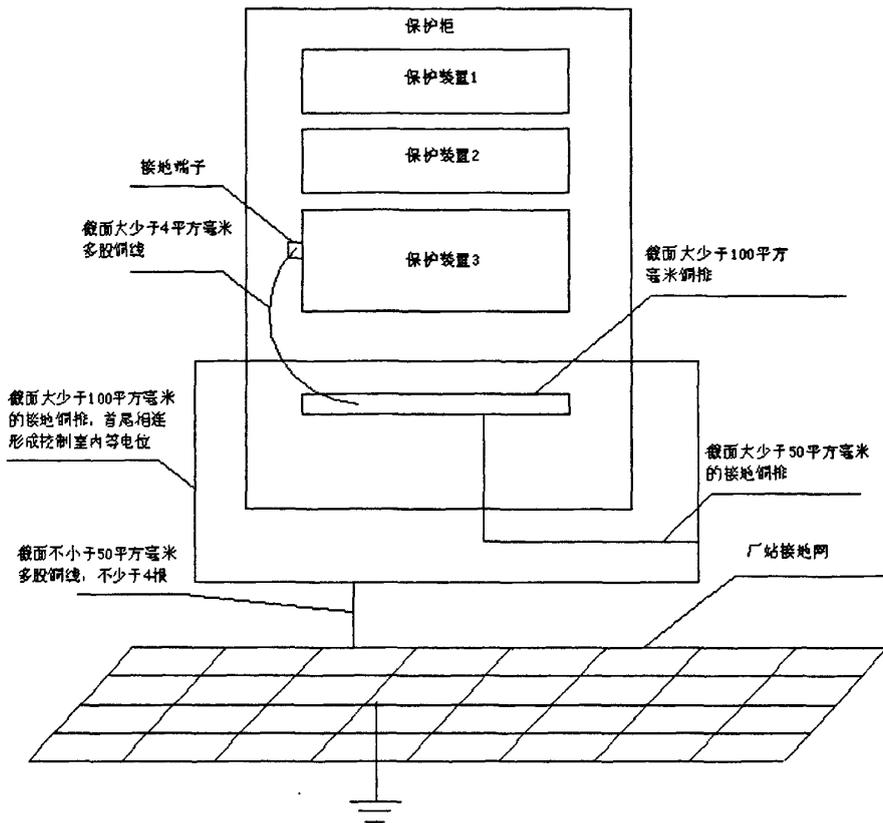


图 6-1 保护柜与变电站接地网连接示意图

5.4.2 其它的抗干扰措施

(1) 交流回路与直流回路不使用同一根电缆，可以防止交直流间的相互干扰。强电回路与弱电回路不使用同一根电缆，屏内连线不捆扎在一起可以防止强电回路对弱电回路的干扰。

(2) 保护装置内部的弱电，一般不引装置，需要引出时，必须经光电隔离或继电器转接，以隔离干扰信号。

(3) 不采用电缆备用芯两端同时接地方法作为抗干扰措施。因为这样作，当接地的电缆芯两端地电位不同时，会在接地的电缆芯中产生电流，对不接地的电流芯产生干扰。

(4) 对继电器等感性元件，要采取防止切断感性电流产生干扰电压的措施。一般采用在感性元件两端并联串有电阻的反向二极管，而不能在继电器接点

上并联电容。

(5) 为防止户外高压配电装置等产生的无线电干扰波侵到室内，控制室及继电保护室应设电磁屏蔽网，或利用建筑体本身的钢筋连接后屏蔽体，保护屏柜及装置的外壳要可靠接地。对集成电路等抗干扰能力较差的保护装置，必要时应增加屏蔽网。在继电器室，应限制使用无线对讲机等无线通信设备。

(6) 在可能引入雷电波的回路，可安装避雷装置。

5.5 本章小结

微机保护本身在抗干扰方面有硬件和软件两方面，保护装置通过在开入/开出系统、数据采集系统、电源系统等硬件方面采取接地、隔离、屏蔽等方面的措施对干扰信号进行隔离。同时也对已经进入保护装置的数据进行软件方面的抗干扰处理，通过采用数字滤波器和各种专用的算法程序，可以进一步地消除干扰水平，提高保护装置及监控系统的安全可靠性。

第 6 章 结论和展望

6.1 结论

通过本文的论述分析,得出以下结论:

(1) 二次回路干扰的来源:主要来源于一次回路和二次回路本身。对于一次回路主要产生在一次系统的暂态过程 and 不对称运行时,如一次系统遭受雷击时高压母线上的高频行波;一次系统中发生的各种形式的短路;断路器或隔离开关操作时的火花放电等。二次回路自身的干扰主要是回路中的电感元件开断时的暂态干扰电压。此外,380/220V 交流电,无线电干扰等等都会在二次回路中产生干扰。

(2) 二次系统干扰的传播途径:主要通过电场耦合、磁场耦合、电磁辐射进行干扰传播。具体表现在:一次设备和二次设备间的静电耦合,包括一次母线和二次电缆间的静电耦合及互感器一、二次绕组间的静电耦合等;一次回路和二次回路间的电磁耦合,包括一次母线和二次电缆以及互感器一、二次绕组间的电磁耦合等;地电位的不均匀升高等。

(3) 对干扰电压的抑制:采用增大耦合阻抗及静电屏蔽等方法对静电耦合进行抑制;采用减小互感阻抗和电磁屏蔽等对电磁干扰进行抑制;以电缆屏蔽层单端接地等方法进行地电位差干扰抑制;合理设计主接地网,加强接地网的维护,等等。

(4) 微机弱电系统的干扰抑制:在硬件上进行隔离、屏蔽、接地等措施,利用软硬件结合的看门狗技术、出口编码校核和冗余技术对干扰进行抑制;在保护屏端子排处采取措施和合理安排屏柜接地(形成等电位面)降低入口干扰电压等。

6.2 存在的问题

总的来说,二次及保护系统抗干扰是个非常复杂的系统问题,决定要彻底的解决这个问题还有许多的工作要做。二次系统的抗干扰工作也是长期的、复杂的工项目,二次系统装置及二次电缆的接地也根据其工作环境,呈现异常的复杂多样性。

随着电力系统的规模扩大和复杂性的增加,对继电保护的抗干扰要求也进一步加强,采用屏蔽电缆并利用屏蔽层接地是采用最广泛的工程上的抗干扰措施,但对于不同环境和不同要求下屏蔽层应如何接地,及除了各装置本身的抗干扰措施外,如何降低装置入口的干扰水平,还有很多工作需要在实践中不断进行总结和研究,本文即是在这个方向上的初步探索,要做的工作还很多,希望本文能够抛砖引玉,对后来的研究者有所借鉴。

参考文献:

- 【1】贺景亮 编 “电力系统电磁兼容” 北京: 水利电力出版社 1993
- 【2】王洪新, 贺景亮 “电力系统电磁兼容” 武汉: 武汉大学出版社 2004.5
- 【3】白同云, 李晓德 “电磁兼容设计” 北京: 北京邮电大学出版社 2001
- 【4】李乐乐, 谢志远, 李娜 “变电站二次设备的抗干扰性研究” 电测与仪表 2008 年第 02 期
- 【5】黄健, 张永宏 “变电站自动化系统电磁兼容及对策” 国电南自
- 【6】王保仑 “电力二次系统接地及抗干扰方法研究” 东南大学工程硕士论文
- 【7】周栋骥, 林小民, 苏小棣 “静态保护的抗干扰措施” 电力自动化设备 1992 年第一期
- 【8】刘帆, 陈柏超, 卞得钢 “变电站二次电缆屏蔽层接地方式探讨” 华北电力技术 2002 年第 8 期
- 【9】余敏, 张斌 “微机保护装置的抗干扰” 湖北电力 2008 年 2 月
- 【10】柯赫震 “硬件和软件结合提高微机保护抗干扰能力的措施” 江苏省电机工程学会输配电及电力系统论文集 2004 年第 13 辑
- 【11】钟道隆, “通信系统中的电磁干扰与屏蔽接地” [M], 国防工业出版社, 1997 年
- 【12】蔡敏, 殷建钢, “暂态过程中 TV 二次回路接地对继电保护影响及对策” [J], “电力自动化设备” 2002 年第 2 期
- 【13】佚名, “电磁兼容中的接地技术”, 中国电器论坛网, 更新时间 2003 年 12 月 29 日, 文章录入: 华瑞
- 【14】邝能杰, “互感器的接地”, “电世界”, 1988 年第 4 期
- 【15】宋继成, “220-500kV 变电所二次接线设计” [M], 中国电力出版社 1996
- 【16】崔翔, “第 39 届国际大电网会议电力系统电磁兼容研究进展综述”, “电力系统电磁兼容环境与电磁兼容学术研讨会论文集”, 2002 年 10 月
- 【17】郭雄, “500kV 变电站电磁骚扰现象及水平”, 武汉高压研究所, “电力系统电磁兼容环境与电磁兼容学术研讨会论文集”, 2002 年 10 月
- 【18】万保权、郭雄, “高压变电站骚扰源特性及强度分析”, 国家电力公司武汉高压所
- 【19】聂定珍、张广州, “电力系统中的电磁现象及模拟计算”, 国家电力公司武汉高压所
- 【20】李冬根、万鹏, “雷电瞬变电磁辐射危害机理及计算”, 湖南省邮电管理局

- 【21】吴维宁、张文亮，“电力系统中电子装置硬件看干扰技术的研究与应用”，国家电力公司武汉高压所
- 【22】武尚德，“计算机系统防雷技术”，国家电力公司电力自动化研究院
- 【23】傅静波，“电力系统电磁兼容技术现状及发展”验收资料，
- 【24】“GUIDEON EMC IN POWER PLANTS AND SUBSTATIONS”， GRGRE Working Group 36.04
- 【25】“EMI CHARACTERIZATION OF HVAC SUBSTATION-UPDATED DATA AND INFLUENCE ON IMMUNITY ASSESSMENT ”， CIGRE Working Group 36.04
- 【26】David Chapman, Electrical Design — A Good Practice Guide [j], www .oda.org.uk
- 【27】IEEE-SA Standards Board, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding [IEEEStd[J] 80-2000.13-17
- 【28】李贵山, 杨建平, 黄晓峰. 电磁干扰(EMI)和射频干扰(RFI)其抑制措施研究【J】. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(4): 36-40.
- 【29】朱玛. 微机继电保护抗干扰研究【D】. 华北电力大学(北京), 2005, 6: 5—8.
- 【30】付润江, 金波, 杜勇. 电快速脉冲群干扰的频谱分析及消除方法【J】. 长江大学学报(自然科学版),2005, 2(7): 245-247.
- 【31】王梅义. 电网继电保护应用【M】. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- 【32】屠幼萍, 何金良, 曾嵘. 变电站电磁干扰源对二次系统的传播途径【J】. 电力建设, 2000,(10): 16-18.
- 【33】罗钰玲. 电力系统微机继电保护【M】. 北京: 人民邮电出版社, 2005.
- 【34】吴良斌. 现代电子系统的电磁兼容性设计【M】. 北京: 国防工业出版社. 2004.
- 【35】<SOME RESULTS OF EMC INVESTIGATIONS IN RUSSIAN SUBSTATIONS>M .K. Kostin,A .Ovsyannikov,S. Zhivodenrikov RUSSIA
- 【36】<EMC and the ABB Group in the next millennium> Sten Benda <ABB Review 6/1999>
- 【37】<Lighting protection for electric utility and industrial applications> Sten Benda<ABB Review 4/1998>
- 【38】<SWITCHING TRANSIENT FIELDS IN SUBSTATIONS> C.M.Wiggins,S.E.Wright IEEE Transactions on Power Delivery Vol.6.No.2, April 1991
- 【39】<ASSESSMENT OF THE FIELD RADIATION BY A GIS IN AN URBAN ENVIRONMENT>M.Lanoz,D .Tabara,P .Zweiacker

- 【40】 <GIS Instrument Transformers:EMC Conformity Tests for Reliable Operation in an Upgraded Substation>W .Buesch,G .Palmieri,M.Miesch
- 【41】 IEC 61000-6-5 Generic Standards-Immunity for power station and substation environments
- 【42】 <APPLICATION OF SHIELDED CABLES IN HV SUBSTATIONS>M.Kirschvink, J.Hoeffelman,J.Gorablenkow GIGRE 36-101 Session 2000
- 【43】 EMC/EMI SELECTED READINGS IEEE
- 【44】 C.R .P aul Analysis of Multiconductor Transmission Lines
- 【45】 Westinghouse Electric CorPoration, APPLIED Protective Relaying, 1982
- 【46】 CSingh, A.D.Paton • Models and Concepts for Power System Reliability Evaluation Including Protection — system Failures.
- 【47】WSCC Relay work GrouP, Review of WSCC Disturbances1998 — 1999.【online】Available: http://www.wecc.biz/committees/OC/T05/RWG/documents/RWGReviw_WSCC_Disturbances1998_99.pdf
- 【48】David C Elizondo, J de la Ree, Arun GPhadke, Stan Horowitz. Hidden failures in Protection Systems and their impact on wide — area disturbances[J]. Power Engineering Society Winter Meeting, 2001, IEEE, 2:710 — 714.
- 【49】S.Tamronglak, S.H.Horowitz, A.G.Phadke, J.S.ThorP.Anatomy of power system Blackouts: Preventive Relaying strategies[J]IEEE Transactions on Power Delivery, VolII, No.2, April 1996:708-715
- 【 50 】 Arun G.Phadke.Hidden Failures in Protection Systems[M].Power systems and Communications Infrastructures for the future, Beijing, September2002

作者简历及在学期间工作成果

作者 1996 年毕业于南京电力专科学校电力系统继电保护及安全自动装置专业，多年来一直从事我局 220kV 及以下变电站的二次安装与调试工作。具有多年工作经验，同时也具备扎实的专业知识，对当前运行各种继电保护装置有较好的掌握，并熟悉一次设备，能独立排除二次设备的各种故障，并能独立组织大型项目的施工与调试。作者目前拥有国家注册一级电气建造师资格。

在学期间主要工作成果：

1. 2007/10 代表衢州电力局参加浙江省电力公司继电保护技能竞赛取得个人第一名。
2. 2008/10 代表浙江省电力公司参加华东电力公司继电保护技能竞赛取得个人第一名。
3. 2006 年作为 110kV 东华输变电工程项目经理，该工程获衢州市建筑业协会“衢江杯”。

致 谢

本论文是在导师何奔腾教授的悉心指导下完成的。感谢何老师对本文撰写过程的悉心指导，使我结合工程实际找到了理论研究的良好切入点，特别是使我逐步掌握了如何采用科学的理念和方法积极解决工程实际应用中的各种问题的能力。何老师渊博的学识和严谨的作风给学生留下了深刻的印象，并将使我受益终身。

同时，特别感谢徐蓼高级工程师，他的热情帮助和指导使我受益匪浅。

最后，要感谢家人、亲友和同事。在我求学期间，他们给予了最大的关怀、理解和支持，在此向他们表示深深的谢意！