

ABSTRACT

With the expansion of power system scale, it becomes more and more important to keep power system's reliability and stability, as well as super performance and dynamic quality. Synchronous generator governor is an important part of power system operation. It is designed to reduce frequency pulsation, balance the distribution of active power and steady operation of the system. Synchronous generator governor regulates the mechanical power from prime motor to generator in order to realize the power and frequency adjustment and keep the normal operating frequency. It is important to build a power system with good dynamic quality and stability by using the controlling the governor bell crank properly by the principles of automatic control and operation theory.

On the base of the research of synchronous generator governor, this paper firstly established the mathematic model of a double-reheat steam turbine including governor. Then the corresponding synchronous generator state equations including the governor and quick-response excitation can be got. The establishment of the system state equations is the basis of the dynamic emulation experiments of speed control system.

Based on the particle swarm theory and characters of the power system, this paper improves the speed control system with chaos particle swarm algorithm. This modified optimization algorithm. The particle swarm algorithm was choose as the main part, and prescribed number steps chaos search was taken on the best particle. The global optimum solution can be got and precision can be improved by using this algorithm. In this paper a new design of speed control system for synchronous generator based on chaos particle swarm algorithm was proposed in this paper and a new speed control system was designed on the basic of chaos particle swarm algorithm, which use chaos particle swarm algorithm for the parameters optimization of it.

Simulation of one machine-infinite system is programmed in two different conditions, they are mechanical disturbance and short-circuit fault. Through comparing the frequency of generator which is controlled separately by traditional PID controller, controller based on particle swarm algorithm and controller based on the chaos particle swarm algorithm, the conclusion could be got that the last controller has the advantage as follows: it is independent to the project experience, simple and

practical, additional, it can still get a very good output even if the generator operates in the deviating point, that means it has a good robustness.

A simple inter-connected system model is established in this paper on the basic of the one machine-infinite system. Through the simulation which inference happens in one scale, the superiority of the controller based on modified particle swarm algorithm is certificated again. Also through the compare of the frequency curve between pre-fault and post-fault, the advantage of the inter-connected system is shown.

KEY WORDS: synchronous generator, speed control system, particle swarm algorithm, chaos search, inter-connected system

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和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，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 天津大学 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了谢意。

学位论文作者签名：石欣 签字日期：2007年6月15日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 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，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名：石欣

导师签名：姜东奎

签字日期：2007年6月15日

签字日期：2007年6月15日

第一章 绪论

1.1 课题研究的意义

随着国民经济的高速增长,社会生产和社会活动的各个方面对电能的需求量日益增多。电力工业作为国民经济的先导行业,得到了迅速的发展,目前已进入了大电网、大机组、高参数、高度自动化的时代,保证系统运行的可靠性和稳定性,提供合格的电能质量和良好的动态品质,对国民经济和人民生活水平具有极为重要的意义。

频率是电力系统最重要的运行参数之一,电力系统的频率偏离其额定值会对发电机和系统的安全运行产生不利的影晌。这主要表现在以下几个方面:(1)系统频率变化将影响发电厂中带动厂用机械的异步电动机的正常运行,从而影响发电厂的正常运行。(2)频率下降时,将引起汽轮机叶片振动,严重时会发生叶片断裂事故,进而缩短汽轮机寿命。因此,现代大型汽轮发电机组对系统频率有相当严格的要求。(3)电力系统频率低时,将使系统变压器和异步电动机励磁电流增加,并引起系统所需要的无功功率增加,造成电压下降,从而增加了系统电压调整的困难。

电力系统频率变化对用户的不利影响主要表现在以下几个方面:(1)频率变化将引起异步电动机转速的变化,从而影响到产品的质量。(2)系统频率下降将使电动机的转速和功率降低,导致传动机械的出力降低,从而影响到国民经济各行业的效率。(3)现代工业、国防和科学研究部门广泛采用各种电子技术设备,如系统频率不稳定,将会影响这些电子设备的精确性。为使系统频率符合电能质量标准,采取一定的频率调整措施是必不可少的。

电力系统的频率和发电机的转速有着严格的关系。发电机的转速是由作用在发电机转轴上的转矩平衡所确定的。原动机输入的功率减去各种机械损耗后,如果能同发电机输出的电磁功率保持平衡,则发电机的转速可以保持恒定。但是发电机输出的电磁功率是由电力系统的负荷运行状态所决定的,而系统发电机输出的电磁功率的总和等于系统的负荷,是时刻在变化的,系统中任何一个负荷发生变化,都会引起系统功率的不平衡,从而导致系统频率的变化。当系统负荷增加时,频率降低;负荷减小时,频率增大。电力系统发电机组的重要任务之一就是,根据负荷的变化进行控制,及时的调节输入到原动机中的功率,来使系统频率的偏移保持在允许的范围之内^[2]。频率的调节是通过原动机的调速系统来实现的。

电力系统频率调节的性能取决于原动机及其调速系统的性能。当电力系统受到大的扰动后,同步发电机输出的电磁功率会突然变化,而原动机的功率则几乎不变。这样就会造成发电机转轴上出现不平衡功率,使机组的转速偏离额定转速,发电机产生剧烈的相对运动甚至使系统稳定性受到破坏。但是,如果原动机调速系统调节灵活、快速、准确,通过调速系统来调节原动机的控制阀,改变汽轮机阀门的位置或水轮机的导水叶开度,调整输入原动机的功率来改变原动机的出力,使原动机输出的有功功率的变化能跟上发电机输出的电磁功率的变化,那么,发电机转轴上的不平衡功率便会大大减小,从而可以防止暂态稳定的破坏,使发电机能保持在额定转速下运行。由此可见,发电机调速系统的性能对电力系统的有功功率平衡有重要作用。因此,对发电机的调速系统进行最优化控制,设计出性能良好的调速控制系统具有重要的理论意义和实用价值。

1.2 调速系统的发展与现状

早期用的调速系统是由离心飞锤、杠杆、凸轮等机械部件和错油门、油动机等液压部件构成的,这样的系统一般称为机械液压调节系统(Mechanical-Hydraulic Control 简称 MHC)。该系统用机械元件来达到速度传感、持久性的下降反馈和计算功能,而用液压元件实现涉及较高的功率。用一个阻尼器来提供暂时下降率补偿。MHC 调速系统的调节死区较大,其转速——功率静态特性是固定的,运行中不能加以调节,动态性能指标较差,难于综合其他信号参与调节。

随着汽轮机单机容量的增加和中间再热机组的出现,单元制运行方式的普遍采用,以及电网自动化水平的提高,MHC 系统已经不能适应汽轮机的控制要求,于是出现了电气液压调节系统(Electro-Hydraulic Control 简称 EHC)。EHC 系统在功能方面类似于机械液压调速器。其中的执行机构仍采用液压伺服装置,用电子元件完成转速传感、持久性下降、暂时下降以及其他测量和计算功能。电子元件提供了更大的灵活性,并改善死区带和时间滞后方面的性能,使 EHC 系统具有信号综合方便,运算精确度高,能适应多种运行工况的特点。电子调速器的动态特性常常调节成与机械液压调速器本质上相类似。在 EHC 系统发展的初期,由于电子技术尚不完善,电子器件与产品的质量和性能限制了 EHC 系统的性能和可靠性,因此保留了由机械元件组成的控制器作为后备控制手段,正常控制由电液调节系统完成。当电液调节电路因故障退出工作,还有机械液压式调节系统接替工作,以保证机组的安全连续运行。但是电液并存的系统使得用户不仅必须维护两套调节系统,还必须解决相互跟踪、切换等问题,这使得电液并存系统的实际运行、维护成本升高。

随着模拟电子器件质量的提高,发电机调速控制系统由电液并存工作方式过渡到采用 AEH 纯电调的工作方式,即模拟式电气液压调节系统。这种调节系统保留了液压执行机构,其控制器由模拟电路组成,控制器和液压执行机构之间通过电液转换器相连接。

随着大规模集成电路的应用和计算机技术的飞速发展,计算机运行速度和可靠性的提高,使得计算机在工业控制领域得到了广泛的应用,发电机调速装置进一步发展为以计算机为基础的数字式电液调节系统。这种系统称为 DEH (Digital Electro-Hydraulic Control,简称 DEH)。其特点是控制器采用数字计算机实现,执行机构保留了原有的液压执行机构。早期的数字电调大多是以小型计算机为核心的,微机出现以后,数字电调也采用了微机,并已在我国电厂得到广泛应用。数字控制在通信、控制功能的扩展、故障诊断等方面比模拟控制具有明显的优点,甚至模拟控制很难实现,无法实现的功能,数字控制只要稍作软件修改就可以方便的实现,因此数字控制逐渐成为自动控制的主要形式。在实际应用中,数字控制的输出需要转换为动力才能驱动被控对象的执行机构。也就是说,在计算机与被控对象之间需要一个快速响应的转换环节,被控对象执行机构需要有足够大的驱动力,才能完全响应数字控制的输出。这在发电机调速控制系统中采用电液伺服阀和液压动力作为驱动,通过一个模拟混合级与汽轮机阀门执行器接口,这样组成发电机速度调节的数字式电液调节系统。由于 DEH 系统以电子计算机为脑,以液压元件为手足,充分发挥了它们各自的长处,因此具有以下优点^[3]:

- (1) 系统灵敏度高,稳态精度高,动态响应快。
- (2) 可采用各种调节规律,如 PID、最佳控制规律等。
- (3) 容易综合各种信号。
- (4) 容易实现各种逻辑电路。
- (5) 容易满足各种运行方式要求。
- (6) 便于与系统连接,实现进一步自动化。
- (7) 提供可编程的死区带,以避免调速器对小频率变化的响应。

DEH 系统中,计算机数字式控制是把被控对象的相关信息进行采样,并通过输入通道,把模拟量转变为数字量送给计算机,计算机获取这些信息后,按预定的控制规律进行计算,并通过输出通道,把计算结果转换成输出信息去控制被控对象,使被控量达到预期的指标,保持生产过程的稳定。由于计算机的参与,控制规律的选取有了很大的灵活性,尤其是随着现代控制理论和智能控制理论的发展,运用现代控制理论进行电力系统运行性能的最优化控制的研究工作有了迅速的发展,对如何按最优化的方法设计发电机转速控制器也取得了不少研究成果。

1.3 粒子群算法及其应用

1.3.1 粒子群算法的基本思想及其特点

粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)最早是由 Eberhart 和 Kennedy 于 1995 年提出的^[4, 5], 它的基本概念源于对鸟群和鱼群捕食行为的简化社会模型的模拟。设想这样一个场景: 一群鸟在随机搜寻食物, 所有的鸟都不知道食物在哪里, 但是它们知道当前的位置离食物还有多远。那么找到食物的最优策略中最简单有效的就是搜索目前离食物最近的鸟周围的区域。

PSO 算法就从这种生物种群行为特性中得到启发并用于求解优化问题。在 PSO 算法中, 每个优化问题的潜在解都可以想象成 d 维搜索空间上的一个点, 每个点被称之为“粒子”, 所有的粒子都有一个被目标函数决定的适应值, 每个粒子还有一个速度决定它们飞翔的方向和距离, 然后粒子群中的粒子就追随当前群体中的最优粒子在解空间中进行搜索。PSO 初始化为一群随机粒子(随机解), 然后通过迭代寻找最优解。在每一次迭代中, 粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己。第一个是粒子本身所找到的最优解, 这个解叫做个体极值, 另一个极值是整个种群目前找到的最优解, 这个极值是全局极值。

PSO 算法根据粒子速度来决定搜索路径, 且沿着梯度方向搜索, 搜索速度快; 在大多数情况下, 所有的粒子可能较快的收敛于最优解; PSO 采用实数编码, 可直接取目标函数本身作为适应度函数, 根据目标函数值进行迭代搜索; PSO 的各粒子间信息交流采用单向的信息流动方式, 整个搜索更新过程是跟随当前最优解的过程; PSO 的各粒子具有记忆性, 使得领域算子不能破坏已搜索到的较优解; PSO 需要的调节参数不多, 尤其是算法引入收敛因子后, 完全可按照经验值设置参数即可获得较好的收敛性; PSO 有深刻的智能背景, 既适合于科学研究, 又适合于工程应用。但是 PSO 还存在一定问题, PSO 不是保证一定能找到最优解, 由于 PSO 在优化过程中存在两个问题^[7]: 首先, 由于整个粒子群都是根据全体粒子和自身的经验向着最优解的方向“飞行”, 在较大的动量系数作用下, 粒子有可能错过最优解, 在远离最优解的空间中发散, 使算法不能收敛; 其次, 在算法收敛情况下, 由于所有的粒子都向着最优解的方向搜索, 所以所有的粒子趋向同一, 失去解的多样性, 使得后期收敛速度明显变慢, 同时算法收敛到一定精度时, 算法无法继续优化, 算法所能达到的精度比遗传算法要低。因此, 粒子群算法往往需要进行一定的改进以后才能应用。

1.3.2 粒子群算法在电力系统中的应用

粒子群算法在电力系统中的应用研究起步比较晚, 最近几年它在电力系统领

域中应用的研究逐渐显示出广阔的前景。尤其是随着电力市场的建立和完善，如何在电力市场环境中充分发挥粒子群算法的优势来解决电力系统的有关难题，成为了一个新的研究热点。粒子群算法在电力系统中的应用主要体现在以下几个方面：

(1) 负荷经济分配问题^[8, 9]

负荷经济分配问题是机组组合问题的一个子优化问题，是指当给定某运行时段机组的开停计划后，在满足负荷和运行约束的条件下，在运行机组间分配负荷，使电力系统的总运行费用最小或发电公司的利润最大，对于提高系统运行的经济性和可靠性都具有重要意义。该问题本质上是非凸的高维、非线性、不可导优化问题。粒子群算法能考虑机组的爬坡约束，出力限制区约束、非光滑费用函数曲线等非线性约束条件，可以成功解决负荷经济分配，并已在实际中获得应用。

(2) 无功优化控制问题^[10, 11]

电力系统的无功功率平衡是保证电力系统电压质量的必要条件，无功优化可以充分利用电力系统中的无功电源，改善电压质量，减少网络损耗和提高电压稳定性。从本质上讲，无功优化问题是一个离散的、有约束非线性组和优化问题。粒子群算法的出现，为无功优化计算提供了一条新途径。文献[10]和文献[11]都是粒子群算法在电力系统最优潮流和无功优化方面的应用。文献[9]中把粒子群算法和 multi-agent 系统相结合，提出一种全新的算法，在 IEEE30 节点系统上进行的校验，证明该算法具有能得到质量高的解、收敛特性好、运行速度快的优点。

(3) 配电网规划问题^[12, 13]

配电网规划设计新建变电站和馈线段建设时间、建设地点和容量大小的最优选择，以满足未来负荷增长的需要，同时服从变电站容量、馈线段容量、电压降落、辐射状网络结构以及可靠性要求等约束。粒子群算法通过记忆与反馈机制实现了高效的寻优搜索，对解决电网规划这类大规模、带有大量约束条件和离散变量的非线性整数规划问题非常有效。文献[13]研究了根据粒子群算法收敛性受初始粒子分布影响较大的特点，结合非线性单纯体法提出了一种改进的粒子群算法，并在输电网络规划中加以应用。文献以 IEEE18 节电系统和巴西南部 46 节点系统为例进行测试，测试结果表明应用粒子群算法求解电网扩展规划问题是可行的。

(4) 机组优化组合问题^[14]

机组优化组合是在满足各种约束条件的前提下，合理确定在调度期内各种计算时段发电机组开、停计划，使得总的运行费用最小，它是一个典型的组合优化问题，尽管对此问题已进行了大量研究，但是到目前为止，还没有很好的解决它，粒子群算法的出现为机组优化组合问题的解决提供了一种新工具。数值算例验证了这一算法的可行性和有效性。

(5) 检修计划问题

发电机组检修计划是电力系统规划中的一项重要工作,其主要任务是周期性的安排机组的预防性检修,使之能经常保持良好的运行状态,减少故障,延长寿命,从而提高电力系统的可靠性与经济性,它是一个复杂的组合优化问题。文献[15]提出了一种将进化算法的繁殖选择操作算子引入粒子群的改进算法,用以确定发电机组的检修计划,在具体建模时,以周作为计算时段的长度,以生产运行费用和检修费用综合最小为优化目标。文献中以印度尼西亚两个工业园的电力系统的机组检修计划为例进行了计算,试验结果证明该算法在合理的时间段内取得了较好的优化效果。

以上讨论了粒子群算法在电力系统中的应用。除了以上应用,在电力系统的调速系统中,粒子群算法同样有很大的优势,主要体现在控制器中控制参数的优化选择问题上。同步发电机的调速系统是一个非常复杂的,多变的系统,传统的控制参数选择方法很难达到理想的控制效果。粒子群算法是一种智能控制方法,从出现就获得优化领域广大学者的重视,并成功解决了一系列复杂的优化问题,获得了良好的效果。因此,本文采用粒子群算法对同步发电机调速系统的控制器的控制参数进行优化,并针对粒子群算法的一些缺点进行了一定改进,设计了基于改进粒子群算法的同步发电机最优调速控制系统。该控制系统具有反应速度快,鲁棒性强等优点,有效解决了调速系统的控制参数选取问题。

1.4 本文的主要工作

同步发电机调速控制系统是非线性、参数时变、要求响应速度快的闭环反馈控制系统,为了保证整个电力系统和同步发电机的安全稳定运行,对调速控制系统的要求也逐渐提高。随着新技术和新理论的发展,智能型调节器已逐渐成为控制系统的研究方向。基于我国调速控制器的研究现状,本文从调速系统的实际要求出发,对调速控制系统进行了理论分析,针对目前优化方法的不足,进行改进,设计出新的同步发电机调速控制系统。

现将本文的主要工作总结如下:

1. 本文分析了同步发电机调速控制系统在电力系统控制中的重要作用,综合分析了目前各种调速控制器的设计方法及其优劣性,结合我国调速控制的现状,针对PID调速控制方式的特点,对调速控制系统进行了改进。

2. 本文分析了同步发电机调速控制系统的原理,在此基础上建立了同步发电机与转速控制相关的各个部分的数学模型和整个控制系统的传递函数,进而得到完整的同步发电机以及单机无穷大系统的状态方程,为进一步的仿真研究打下基础。

3. 本文分析了粒子群算法的优化原理,同时针对电力系统调速系统的要求和粒子群算法本身存在的问题,采用了将混沌粒子群优化算法,该算法以粒子群算法作为主体,对种群中的最好粒子进行给定步数的混沌优化搜索,指导粒子群向最优解方向搜索。这种方法改善了传统的粒子群算法容易局部收敛,得不到全局最优解和精确度不高的缺点。并在此基础上提出了基于混沌粒子群算法的同步发电机最优调速控制器的设计这一新思想,设计出基于混沌粒子群算法的同步发电机最优调速器。

4. 对单机——无穷大系统进行仿真试验,分发电机有功功率扰动和系统短路故障情况,对每种情况下的传统的调速控制器,基于粒子群算法的调速控制器以及基于混沌粒子群算法的调速控制器的系统频率曲线进行比较,证明基于混沌粒子群算法的调速控制器具有不依赖对象数学模型,对于工程经验依赖性小,简单实用等特点,对于发电机工况的偏离也具有良好的适应性,控制效果明显优于传统优化方法的调速控制器。

5. 本文对电力系统互联区域进行了研究,建立了典型的三区域互联系统的有功功率数学模型,并在 MATLAB 环境下进行了仿真,分析基于混沌粒子群算法的调速控制系统的控制效果,并验证电网的区域互联对电力系统稳定性的影响。

第二章 同步发电机及其调速控制系统

2.1 概述

电力系统频率是电力系统中同步发电机产生的交流正弦电压的频率,它是电力系统运行中最重要的参数之一。在稳态运行条件下,所有发电机同步运行,整个电力系统的频率是相等的。并列运行的每一台发电机组的转速与系统频率的关系为

$$f = \frac{Pn}{60}$$

式中 P ——发电机组转子极对数;

n ——发电机组的转速 (r/min);

f ——电力系统频率 (Hz)。

显然,电力系统的频率控制实际上就是调节发电机组的转速。

从运行角度分析,系统频率的变化是由于发电机的负荷与原动机出力输入功率之间失去平衡所致。发电机组输出的有功功率是随原动机出力变化而改变的,原动机出力越多,机组输出有功就越大;反之,机组输出有功越小。因此可以说,电力系统频率与系统有功功率的平衡紧密相关。系统正常运行时,当系统的全部负荷所消耗的有功功率(包括网损)与发电机组的总出力相平衡时,系统频率保持为额定值;在系统负荷与发电机输出的有功功率的平衡受到破坏时,各发电机组的转速及相应的频率就要发生变化。电力系统运行的主要任务之一,就是对频率进行监视和控制。当系统机组输入功率与负荷消耗的功率之间失去平衡而造成系统的频率偏离额定值时,控制系统即发电机调速系统必须通过改变原动机进汽量(或者进水量)来调节机组的出力,使发电机的输入功率适应负荷的需要,来保证电力系统频率在允许范围之内。

调速器通常分为机械液压调速器和电气液压调速器两类。早期的调速器是机械型的,但是由于机械液压调速器的死区较大,动态性能指标较差,难于综合其他信号参与调节。于是发展了电液调速器,目前在大机组广泛应用的是数字式电液调速器。

按控制规律来划分,调速器又可分为比例积分调速器和比例-积分-微分调速器等。电力系统中广泛应用的是比例积分微分调速器。这种调速器的控制信号有比例、积分、微分三种基本形式,这三种形式各有优缺点,可以取长补短综合利

用。将综合后的信号作为调速器的控制信号，改变功率给定值增量，直到控制信号为零为止。

本文以电力系统中广泛应用的数字式电液调速系统为基础，采用获得良好控制效果的 PID 控制器，并采用效果更好的优化方法来进行控制器参数优化，设计出更好的调速控制系统。本章主要介绍同步发电机的调速系统在电力系统频率调节中的作用，数字式电液调速系统，以及仿真中要用到的汽轮机传递函数，为进一步的仿真研究打下基础。

2.2 调速控制系统的作用

电力生产除了应保证供电数量外，还应保证供电的质量。供电质量指标主要有两个：一是频率，二是电压。这两者都与发电机转速有一定的关系。发电电压除了与汽轮机转速相关外，还可以通过对励磁机的调整来进行调节，而发电频率则直接取决于发电机的转速。汽轮机的调节任务，一方面是供应用户足够的电量，即是调节汽轮机的功率以满足外界用户的需要；另一方面又要使汽轮机转速始终保持在规定的范围之内。

电力系统中向发电机提供机械功率和机械能的机械装置，如汽轮机、水轮机等统称为原动机。为了控制原动机向发电机输出的机械功率，并保持电网的正常运行频率，以及在各并列运行的发电机之间合理分配负荷，每一台原动机都配置了调速器。调速系统一般通过控制汽轮机的汽门开度或者水轮机的导水叶开度来实现功率和频率调节。通过改变调速器的参数及其给定值（一般是给定速度或给定功率）可以得到所要求的发电机功率——频率调节特性^[33]。

调速系统在电力系统频率调节中的作用也可由电力系统的功率——频率调节特性曲线分析。电力系统的功率平衡是一个供需功率随时平衡的动态过程。当电力系统负荷变动时，电力系统频率会发生变化，同步发电机的调速器会自动控制和调整汽轮机的进汽量或者水轮机的进水量，从而控制和调整发电机的输出功率，使电力系统趋于稳定，另一方面，根据电力系统负荷频率特性的特点，负荷本身在电力系统频率变动下，也会相应改变其吸收的功率。所以说，电力系统的频率调节和控制与发电机组频率特性和负荷的频率特性是密切相关的。

电力系统中有许多台发电机组和不同类型的负荷，为了分析电力系统频率特性的方便，必须将所有发电机组和负荷，分别归并为一个等效发电机组和等效负荷。如图 2-1 所示。图中 P_{GI} 为等效发电机组的频率调节特性曲线， P_{DI} 为等效负荷频率调节特性曲线。两条曲线的交点 A 即为系统在初始的稳定状态的工作点（发电机输出的和负荷消耗的有功功率是相等的），这一点对应的电力系统的有功功率为 P_1 、频率为额定频率 f_N 。当电力系统的负荷增加时，负荷特性曲

线向功率增加的方向发生平移，即由 P_{D1} 变化到 P_{D2} (ΔP_{D0} 为负荷功率的原始增量)，如果发电机没有调速器，发电机组输出功率为恒定值 P_1 ，则电力系统频率将逐渐下降，负荷所取用的有功功率也将逐渐减小，依靠负荷的调节效应使运行点稳定在 D 点。如果存在调速系统，由于发电机输出的有功功率不能随负荷的陡然增加而及时变动，发电机组将减速，电力系统频率将下降。在系统频率下降时，发电机输出的有功功率将因为调速器的一次调整作用而增加，同时负荷所需要的有功功率也将因为本身的调节效应而减少。前者沿着发电机组的有功功率——频率静态特性曲线 P_{G1} 向上增加，而后者沿着负荷的有功功率——频率静态特性曲线 P_{D2} 向下减少，最后在新的平衡点 B 点稳定下来。因此，这一调节过程由发电机和负荷共同完成。

由于发电机的频率调节特性具有调差率，所以最终控制和调整的结果只能缩小频率的偏差，而无法使电力系统频率恢复到原来的数值状态。当系统由于负荷变化引起的频率偏移较大，采取频率的一次控制调整后，系统频率的偏差仍然不能限制在允许的范围内，那么就必须二次调频来解决。此时，可以由值班人员手动操作或自动控制操作调频器，使发电机组有功功率——频率静态特性发生平移，来改变发电机组输出的有功功率，使系统频率保持为负荷增长前的水平或者使频率的偏差在允许的范围内。在图 2-1 中调频器作用，将曲线 P_{G1} 平移到 P_{G2} 的位置，与负荷曲线 P_{D2} 相交于 C 点，这时系统频率就可以恢复到 f_1 或高于 f_1 的数值，而电力系统总的电源功率或负荷功率也将因系统频率回升而略有增加。显然，由于进行了频率的二次调整，电力系统的频率质量有了提高。

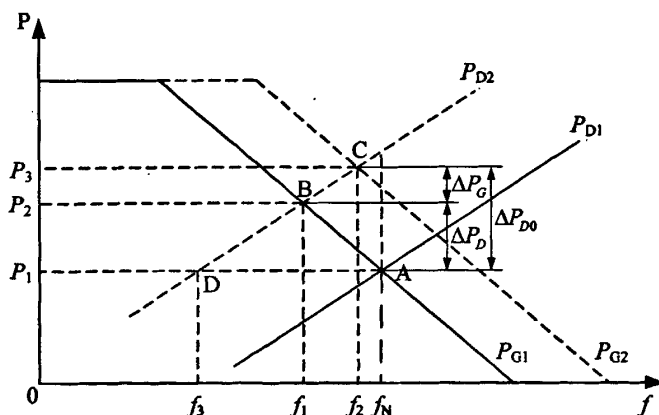


图 2-1 发电机和负荷的功——频特性曲线

综上所述，电力系统的频率调整主要分为一次调整和二次调整，这两种调频都是通过调速器控制发电机的进汽量或者进水量实现的。电力系统的频率调整效果是跟调速器的性能分不开的。

2.3 数字式电液调速系统

数字电液调速系统是自动控制与计算机相结合的产物,利用计算机大量存储信息的能力、完善的逻辑判断能力和快速运算能力来实现机组调速系统的功能。一般数字电液调速系统以数字计算机作为控制器,以电液转换器、高压抗燃油系统和油动机作执行机构,实现对汽轮发电机组的转速和负荷的自动控制。80年代以来,随着微型计算机科学的发展,使得计算机可以实现具有人类智能的控制规律。微机电液调速器已成为大容量汽轮机控制的主流。

2.3.1 数字电液调速系统的优点

和以往的控制方式相比,数字电液调速系统有以下优点^[31]:

(1) 控制品质好

数字电液调速系统可以很方便的使调速系统的结构和参数需要随着机组的不同运行工况进行修改,从而在启动升速、同期并列、发电、甩负荷等各种工况下均能够实现机组运行全过程的最优控制。

(2) 功能多

数字电液调速系统可以充分发挥计算机高速运算和逻辑判断优势,可以实现调速、负载控制、机组自启动控制、升速控制,快速同期并列等功能;对汽轮发电机组,还可以在启动过程中附有热应力管理功能,极大提高了电厂自动化程度。

(3) 灵活性好

由于数字电液调速系统在一套完善的硬件设备做好之后,各种不同功能和性能的实现主要有软件来决定,这就使得数字电液调速系统可以很方便的增、减功能和改变特性。

(4) 运行稳定、抗干扰能力强、工作可靠

数字电液调速系统使用数字电路来实现的。由于数字电路的工作对环境温度和电源电压变化不敏感,这就克服了各种漂移的影响。同时,数字电液调速系统采用自检核自恢复、数字滤波等技术措施消除干扰的影响,这就使得数字式电液调速系统具有较强的抗干扰能力。

2.3.2 数字式电液调速系统的结构

数字式电液调速系统是计算机数字式控制的输出通过电液转换环节,以液动力驱动液压执行机构,控制被控对象,它的结构可以分为四个部分:汽轮发电机组参数测量部分、数字控制部分、电液转换及液压部分。其主要特点是控制电路部分的功能用微机来实现,采用计算机控制技术进行数字运算和软件编程,实现

各种控制功能。由图 2-2 可见，主机与控制对象发电机组（包括原动机）间的输出、输入过程通道和模拟式电液调速器是相同的，如电/液压转换，液压伺服系统以及转速和功率传感器等，由 D/A 或者 A/D 转换电路与主机接口交换消息。

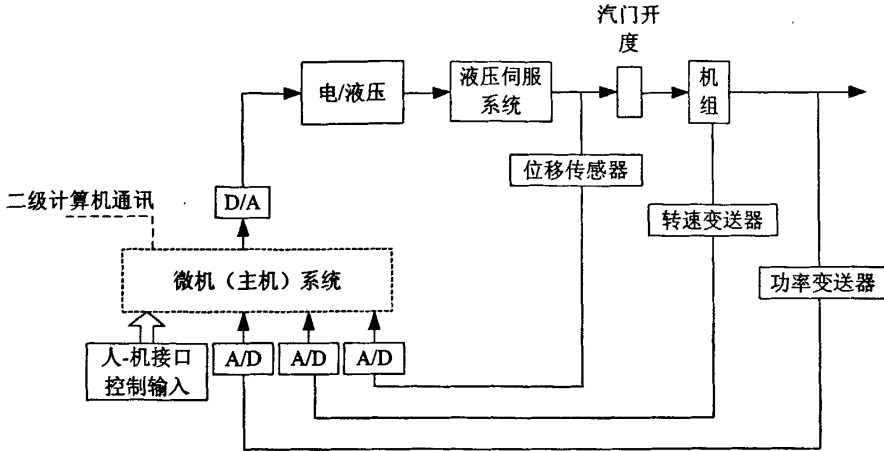


图 2-2 数字式电液调速系统基本框图

调速器的调节控制规律由计算机实现，首先要建立数学模型以及制定运行中的控制原则，然后编程，用软件实现其控制规律。计算机数字控制是对被控对象的转速相关信息进行采样，并通过输入通道，把模拟量变成为数字量送给计算机，计算机获取这些信息以后，根据采集到的实时信息，按预先确定的控制规律进行调节计算，计算结果经由 D/A 输出，去控制电/液压转换，再由液压伺服系统控制原动机的输入功率，完成调速或者调节功率的任务^[2]。

微机控制器是数字式电液调速系统的重要组成部分。微机控制器的硬件有专用控制计算机为核心组成。计算机控制系统的硬件由主机、输入输出接口电路、输入输出过程通道和人机联系设备组成。硬件是控制系统中传递信息的载体，而软件则决定控制规律，对控制系统的特性有重大影响。由于微机调速器的调节规律是由软件实现的，不同的调节规律只表现在软件的不同上，不需要修改硬件，因此微机调速器可以很方便的实现各种不同的控制规律。目前微机调速器及普遍采用按频差的比列、积分和微分调节。

2.3.3 功频电液调速器

目前电厂的汽轮机很多都是中间再热机组为了适应中间再热式汽轮机的调节特点，调节系统一般为功频电液调节。而控制器一般选用 PID 控制器。其原理框图见图 2-3。

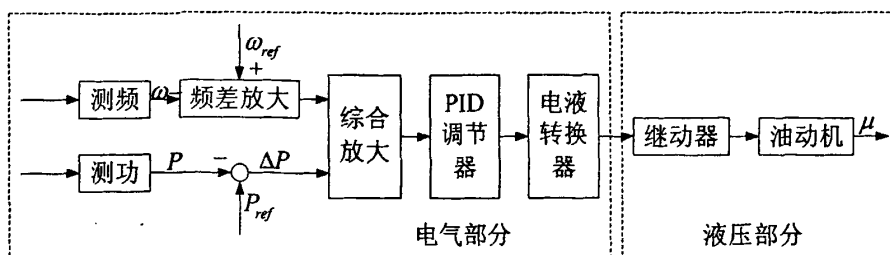


图 2-3 功频电液调速器原理框图

功频电液调速器的测频单元相当于通常调速器的测速单元，而测功单元则是其特有的，它将汽轮机功率转换为一个成比例的电压信号，而作为整个调速器的反馈信号，以便使调节过程中转速偏差和功率偏差基本保持一定的比例关系。PID 调节器把测频、测功单元输出个给定信号作为综合校正放大，其输出经电液转换器转换为机械信号，进入液压部分。

系统中仍然保留了转速反馈信号，是一个双回路闭环调节系统。系统工作过程简述如下：参加一次调频时，以转速偏差去调整调节阀开度，改变汽轮发电机的输出功率，直至功率变化与转速偏差的值在调节器 PID 入口相平衡，PID 输出值不变，调节过程结束。二次调频时，改变机组的功率给定值，PID 调节器入口产生功率偏差，经过系统的调节作用，改变调节阀的开度，调整机组的输出功率，直至 PID 入口功率偏差为零。蒸汽参数变化时，如压力降低，汽轮发电机输出功率减小，出现功率偏差，经调节系统作用开大调节阀，提高输出功率，直至 PID 调节器入口功率偏差为零。因此引入功率反馈信号后能保证汽轮机转速变化与功率变化之间的固定比例关系，是机组一次调频能力保持不变。实际应用时，转速信号取自汽轮机主轴转速，功率信号取自发电机电功率。

2.4 同步发电机调速系统的数学模型

为了仿真比较不同调速控制系统的效果，首先要建立包含调速控制系统的同步发电机的数学模型。本文选择的是常用的传递函数的形式。

2.4.1 原动机的传递函数

原动机是将一次能源转化为机械能的装置。汽轮机把高温高压蒸汽储存的能量转换为旋转机械能量，然后由发电机把其转换为电能。根据机组容量和蒸汽条件，已经建造了各种各样结构的汽轮机。本文的研究选取了普遍采用的矿物燃料单再热器串联复合汽轮机，其结构如图 2-4 所示。

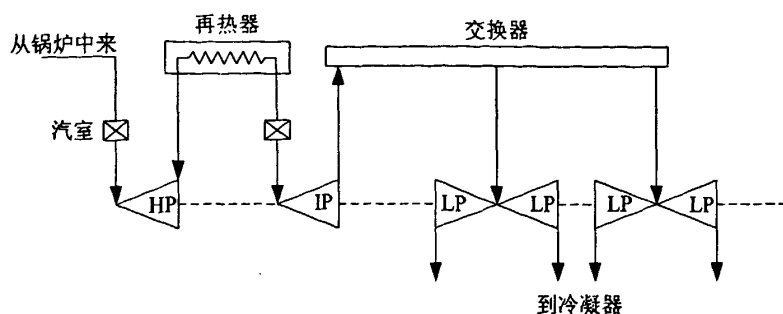


图 2-4 汽轮机结构图

高压调节气阀到高压缸之间有一段较长的连接管道。由于连接管道和蒸汽室能够容纳一定数量的蒸汽，使得汽轮机输出功率的变化滞后于调节气阀开度的变化。这种现象称为汽容影响。汽容影响在数学上可以用一阶惯性环节来描述。考虑汽容影响以后，高压缸功率对调节汽阀开度的传递函数可表示为：

$$W_H(s) = \frac{1}{T_H s + 1} \quad (2-2)$$

式中： T_H ——高压调节汽阀后的汽容时间常数

蒸汽从高压缸出来，进入位于锅炉内的中间再热器，再热蒸汽经再热截止阀和进汽管流入中压涡轮级。由于中间再热器汽容的影响使得中压缸输出功率变化也滞后于高压缸出口蒸汽流量的变化，这相当于一阶惯性环节。因此，中压缸的传递函数可表示为：

$$W_I(s) = \frac{1}{T_H s + 1} \cdot \frac{1}{T_{RH} s + 1} \quad (2-3)$$

式中 T_{RH} ——中间再热器的汽容时间常数，一般为 5~10s。

从中压缸出来的蒸汽要经过交换器才能进入低压缸，流入低压缸的蒸汽流量经历了一个与交换器有关的附加时间常数 T_{CO} 。低压缸的传递函数可以表示为：

$$W_L(s) = \frac{1}{T_H s + 1} \cdot \frac{1}{T_{RH} s + 1} \cdot \frac{1}{T_{CO} s + 1} \quad (2-4)$$

式中 T_{CO} ——交换器的汽容时间常数，其数量级约为 0.5s。

汽轮机高压缸、中压缸和低压缸产生的转矩同时作用在汽轮机转轴上，因此，汽轮机输出的功率 P_m 等于高、中、低压缸产生的功率之和，即

$$P_m = P_H + P_I + P_L$$

将上式进行标幺化，可得： $P_m = K_H P_H + K_I P_I + K_L P_L$

因此汽轮机的传递函数为：

$$W_T(s) = K_H \frac{1}{T_H s + 1} + K_I \frac{1}{T_H s + 1} \cdot \frac{1}{T_{RH} s + 1} + K_L \frac{1}{T_H s + 1} \cdot \frac{1}{T_{RH} s + 1} \cdot \frac{1}{T_{CO} s + 1}$$

式中，一般取 $K_H = 0.2 \sim 0.3$ ， $K_I + K_L = 0.7 \sim 0.8$ ， T_H 和 T_{CO} 约为 $0.2 \sim 0.3s$ ， $T_{RH} = 10s$ 。由于 T_H 和 T_{CO} 与 T_{RH} 相比较小很多，在实际应用时将上式简化为：

$$W_T(s) = \frac{K_H T_{RH} s + 1}{T_{RH} s + 1}$$

2.4.2 调速控制系统的传递函数

(1) 电气部分的传递函数

电气部分包括转速测量、功率测量、频差放大器、加法器、PID 调节器和功率放大器。

(2) 电液转换器的传递函数

电液转换器，用来将控制回路输出的电信号转换为液压信号，再经过放大后控制油动机去启闭阀门。一般电液转换器被视为一阶惯性环节。但是由于时间常数很小，常被简化为比例环节，比例系数用标幺值表示时为 1。

(3) 机械液压随动系统的传递函数

电液调速器的机械随动系统主要由继电器、错油门和油动机组成。

1. 继电器和错油门的传递函数

继电器和错油门的输入为电液转换器输出的油压变化 ΔP ，输出为错油门内部“王”字阀的移动距离 ΔS 。 ΔS 与 ΔP 成正比，且稍有滞后，为一阶惯性环节。继电器和错油门可简化为比例环节，用标幺值表示时，比例系数为 1。

2. 油动机的传递函数

油动机即液压缸，是用以直接操作蒸汽阀门的装置。

油动机活塞运动方程可表示为

$$T_s \frac{d\mu}{dt} = \sigma \text{ 和 } \mu = \frac{\Delta m}{\Delta m_{\max}}$$

式中 T_s ——油动机的时间常数，一般为 $0.1 \sim 0.2s$ ；

μ ——油动机活塞位移的相对值；

Δm ——油动机活塞的位移；

Δm_{\max} ——油动机活塞从机组空载到额定负载的位移值；

σ ——错油门位移变化的相对值。

对上式进行拉氏变换，得

$$T_s S \mu(S) = \sigma(S)$$

油动机的传递函数为

$$W_{TD}(S) = \frac{\mu(S)}{\sigma(S)} = \frac{1}{T_s S}$$

为方便运算,在不影响仿真效果的基础上,对整个机械液压随动系统的传递函数进行简化,简化框图如图 2-5 所示:

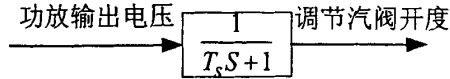


图 2-5 机械液压随动系统传递函数简化框图

2.4.3 发电机和负荷的传递函数

如果负荷发生变化,这一变化立即反映到发电机,表现为发电机输出的电动转矩 T_e 的变化。这引起机械转矩 T_m 和电动转矩 T_e 不匹配,这反过来导致运动方程中所确定的速度发生变化。电动机机械转矩和转子速度的函数关系可以用如下公式表示:

$$T_m - T_e = 2Hs \cdot \Delta\omega_r$$

式中 T_m ——机械转矩

T_e ——电动转矩

H ——惯性常数

$\Delta\omega_r$ ——转子速度偏移量

为方便对负荷——频率的研究,用机械和电动功率代替转矩来表示上述关系。功率 P 和转矩 T 之间的关系为

$$P = \omega_r T \quad (2-5)$$

考虑到从初始值(下标 0 表示)的微小偏差(用前缀 Δ 表示),可写出

$$P = P_0 + \Delta P, \quad T = T_0 + \Delta T, \quad \omega_r = \omega_0 + \Delta\omega_r$$

由式(2-5)得

$$P_0 + \Delta P = (\omega_0 + \Delta\omega_r)(T_0 + \Delta T)$$

当忽略高阶项,扰动值之间的关系式可给出为: $\Delta P = \omega_0 \cdot \Delta T + T_0 \cdot \Delta\omega_r$

因而有

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \omega_0(\Delta T_m - \Delta T_e) + (T_{m0} + \Delta T_{e0})\Delta\omega_r$$

由于在稳态时电动转矩和机械转矩相等, $T_{m0} = T_{e0}$ 。当转速用标么值表示, $\omega_0 = 1$,

因而有

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \Delta T_m - \Delta T_e$$

电动机机械转矩和转子速度的函数关系可以转化为如下形式:

$$\Delta P_m - \Delta P_e = Ms \cdot \Delta\omega_r$$

一般来说,电力系统负荷是一系列电气装置的总和。像照明和加热之类的电

阻型负荷，其电功率与频率无关。但像风机和泵之类的电动机负荷，其电功率将由于频率波动导致转速的变化而改变。整个复合负荷对频率的依赖关系可由此得到

$$\Delta P_e = \Delta P_e + D\Delta\omega,$$

式中 ΔP_e 为对频率不敏感的负荷变化； $D\Delta\omega$ 为对频率敏感的负荷变化； D 为负荷——阻尼常数。负荷——阻尼常数可表示为频率变化 1% 所引起的负荷变化百分率。 D 的典型值是 1% 或者 2%。 $D=2$ 意味着 1% 的频率变化将引起 2% 的负荷变化。包括负荷阻尼影响的负荷和汽轮机传递函数是

$$\Delta P_m - \Delta P_e = (Ms + D) \cdot \Delta\omega,$$

2.4.4 有调速系统的同步发电机传递函数

根据以上分析，图 2-6 所示汽轮发电机组功频电液调速系统传递函数，该调速系统中的调速器为目前广泛应用的 PID 调速器。

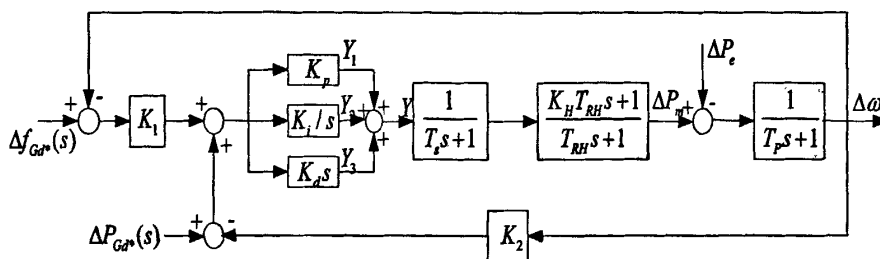


图 2-6 中间再热式发电机调速系统传递函数框图

其中 ΔP_m —— 汽轮机机械功率

ΔP_e —— 负荷变化量

P_{ref} —— 参考负荷

$\Delta\omega$ —— 频率变化量

K_1, K_2 —— 速度调节，值取决于稳态速度与发电机负荷特性之比

由传递函数得各部分微分方程如下：

$$K_1(\Delta f_{Gd^*} - \Delta f) + (\Delta P_{Gd^*} - K_2\Delta f) = Y_0 \quad (2-5)$$

$$Y_0(K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s) = Y \quad (2-6)$$

$$Y \frac{1}{T_s s + 1} = \Delta P_G \quad (2-7)$$

$$\Delta P_G \frac{K_H T_{RH} s + 1}{T_{RH} s + 1} = \Delta P_M \quad (2-8)$$

$$(\Delta P_M - \Delta P_e) \frac{1}{T_p s + 1} = \Delta f \quad (2-9)$$

整理以上方程为微分形式:

$$\text{由式(2-9)得: } \Delta P_M - \Delta P_e = (T_p s + 1) \Delta f = T_p \dot{\Delta f} + \Delta f$$

$$\text{整理得 } \dot{\Delta f} = -\frac{1}{T_p} \Delta f + \frac{1}{T_p} \Delta P_M - \frac{1}{T_p} \Delta P_e \quad (2-10)$$

$$\text{令 } Y_1 = K_p Y_0,$$

$$Y_2 = (K_I / s) Y_0, \quad (2-11)$$

$$Y_3 = K_D s Y_0,$$

$$\text{则 } Y = Y_1 + Y_2 + Y_3$$

把式(2-6)代入整理得:

$$\begin{aligned} Y = & (K_1 + K_2) \cdot \left(\frac{K_D}{T_p} - K_p \right) \Delta f + Y_2 - (K_1 + K_2) \frac{K_D}{T_p} \Delta P_M \\ & + (K_1 + K_2) \frac{K_D}{T_p} \Delta P_e + K_1 K_p \Delta f_{Gd^*} + K_p \Delta P_{Gd^*} \end{aligned} \quad (2-12)$$

由把式(2-6)代入式(2-11)得:

$$\dot{Y}_2 = K_I Y_0 = K_I [K_1 (\Delta f_{Gd^*} - \Delta f) + (\Delta P_{Gd^*} - K_2 \Delta f)]$$

$$\text{整理得: } \dot{Y}_2 = -(K_1 + K_2) K_I \Delta f + K_1 K_I \Delta f_{Gd^*} + K_I \Delta P_{Gd^*} \quad (2-13)$$

$$\text{由式(2-7)得: } \Delta \dot{P}_G = \frac{1}{T_s} Y - \frac{1}{T_s} \Delta P_G$$

把式(2-12)代入, 整理得:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{P}_G = & \frac{K_1 + K_2}{T_s} \left(\frac{K_D}{T_p} - K_p \right) \Delta f + \frac{1}{T_s} Y_2 - \frac{1}{T_s} \Delta P_G - (K_1 + K_2) \frac{K_D}{T_s T_p} \Delta P_M \\ & + (K_1 + K_2) \frac{K_D}{T_s T_p} \Delta P_e + \frac{K_1 K_p}{T_s} \Delta f_{Gd^*} + \frac{K_p}{T_s} \Delta P_{Gd^*} \end{aligned} \quad (2-14)$$

$$\text{由式(2-8)得: } K_H T_{RH} \Delta \dot{P}_G + \Delta P_G = T_{RH} \Delta \dot{P}_M + \Delta P_M$$

把式(2-14)代入, 整理得:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{P}_M = & \frac{(K_1 + K_2) K_H}{T_s} \left(\frac{K_D}{T_p} - K_p \right) \Delta f + \frac{K_H}{T_s} Y_2 - \frac{(K_1 + K_2) K_H K_D T_{RH} + T_s T_p}{T_s T_p T_{RH}} \Delta P_M \\ & + \frac{T_s - T_{RH}}{T_s T_{RH}} \Delta P_G + (K_1 + K_2) \frac{K_H K_D}{T_s T_p} \Delta P_e + \frac{K_1 K_H K_p}{T_s} \Delta f_{Gd^*} + \frac{K_H K_p}{T_s} \Delta P_{Gd^*} \end{aligned} \quad (2-15)$$

整理方程(2-10)(2-13)(2-14)(2-15), 写成微分方程的标准形式 $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U}$ 得:

$$\dot{\mathbf{X}} = [\dot{\Delta f} \quad \dot{Y}_2 \quad \Delta \dot{P}_G \quad \Delta \dot{P}_M]^T$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_p} & 0 & 0 & \frac{1}{T_p} \\ -(K_1+K_2)K_I & 0 & 0 & 0 \\ \frac{(K_1+K_2)(K_D-K_P T_p)}{T_S T_p} & \frac{1}{T_S} & -\frac{1}{T_S} & -(K_1+K_2)\frac{K_D}{T_S T_p} \\ \frac{(K_1+K_2)K_H(K_D-K_P T_p)}{T_S T_p} & \frac{K_H}{T_S} & \frac{T_S-T_{RH}}{T_S T_{RH}} & \frac{(K_1+K_2)K_H K_D T_{RH} + T_S T_p}{T_S T_p T_{RH}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X} = [\Delta f \quad Y_2 \quad \Delta P_G \quad \Delta P_M]^T$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_p} & 0 & 0 \\ 0 & K_1 K_I & K_I \\ (K_1+K_2)\frac{K_D}{T_S T_p} & \frac{K_1 K_P}{T_S} & \frac{K_P}{T_S} \\ (K_1+K_2)\frac{K_H K_D}{T_S T_p} & \frac{K_1 K_H K_P}{T_S} & \frac{K_H K_P}{T_S} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{U} = [\Delta P_e \quad \Delta f_{Gd^*} \quad \Delta P_{Gd^*}]^T$$

该方程即为求解单机无穷大系统状态方程的微分形式，在建立该方程的过程中考虑了同步发电机的调速系统，同时励磁系统设定为理想的快速励磁装置，即可保证发电机的机端电压的大小时刻为额定值。方程中， Δf 、 Y_2 、 ΔP_G 、 ΔP_M 为方程中的变量，也是传递函数中的中间变量，作为上述方程的输入量，它们变化是负荷的扰动引起的，并相互联系共同构成表征单机无穷大系统状态的变量。相对于实际电力系统，其中 Δf 为发电机输出频率的变化； ΔP_G 为原动机输出的机械功率，即输入到汽轮机中的机械功率； ΔP_M 为汽轮机输出的功率，即为发电机输出的机械功率。在本文设计的调速系统的仿真中将用到该微分方程的差分形式。

第三章 基于混沌粒子群算法的发电机最优调速控制系统的设计

3.1 概述

电力系统是一个复杂的动态大系统,在这种大系统中通常可用传统的控制方法对发电机的输出功率进行调整和控制,以保持电力系统负荷波动时系统功率的平衡和系统频率的质量。随着电力技术的发展,发电机组的容量日益增大,电网结构及其运行方式日益庞大和复杂,从而使电力系统的数学模型复杂化,加上电力系统中各个环节存在的非线性和多变量的交叉与耦合,使得电力系统的数学模型更加难以建立和求解。由于运行方式的多变性和模型的非线性,电力系统中控制器参数的调整相当困难。近年来所研究的电力系统有功功率与频率的自适应控制和变结构控制方法,可以提高控制器的自适应能力和鲁棒性。但是传统的自适应控制随着电力系统未知参数数目呈指数增长使控制算法变得复杂化,变结构在控制点切换时将存在颤振现象,因此有必要研究一种新的,有效的电力系统有功功率和频率控制方法。

PID 控制的智能化是当今一个重要的热门课题。PID 控制具有结构简单、容易实现、控制效果好和鲁棒性强等特点,因而在控制领域仍有广泛的应用。PID 控制的优劣完全取决于 PID 参数 K_p 、 K_I 、 K_D 的整定和优化。现在已有一些 PID 参数的优化方法。如 Z-N 法、遗传算法、一群算法优化 PID 参数,近年来又提出了利用粒子群算法优化 PID 参数。

粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 是蓬勃发展的进化计算技术中的一种,最早由 J.Kennedy 和 R.C.Eberhart 两人与 20 世纪 90 年代提出。该算法源自对鸟群捕食行为的研究,模拟社会的群体行为,在多维空间中构造被称为“粒子群 (Particle)”的系统进行寻优。每个粒子通过统计迭代过程中自身和群体发现的最优值修正自己的前进方向和速度。PSO 问世以来,大量研究成果表明:该算法操作简便,收敛速度快,解质量高,鲁棒性好,依赖的经验参数较少等优点,已成功运用于求解多维非线性函数优化、神经网络、整数优化、以及大量基于工业背景的优化问题。PSO 算法在电力系统中的应用研究起步比较晚,但是已在很多方面得到了应用,如:求解无功优化和潮流计算、电网扩展规划、负荷经济分配、机组组合、检修计划等。

大量实验研究表明,在大多数情况下 PSO 可以收敛至满意解。在满足一定的条件下,PSO 算法可以避免发散,并收敛至局部最优解,但是基本 PSO 算法

除对于特殊函数外，并不能证明具有全局收敛性（由于算法的随机性，并不排除实际计算时得到全局最优解的可能性，但不具备理论上的严格性）。本文根据基本 PSO 算法流程，提出一种混沌粒子群算法，并设计出基于混沌粒子群算法的同步发电机最优调速控制系统，电力系统仿真试验表明该调速控制器有很好的控制效果。

3.2 PID 调速器

目前同步发电机广泛应用的频率控制器是PID调速系统。同步发电机PID调速系统如图3-1所示。当系统出现扰动或者故障时，同步发电机的转速发生变化，偏离了原来的额定转速，此时，测量反馈单元检测到频率的这一变化，并且将系统频率反馈回来，重新与基准频率进行比较，得到偏差 $e(t) = f_{REF} - f_G$ ，这一偏差输入到PID调速器当中，调速器根据频率偏差给出调节命令，电液执行机构根据这一命令相应的调节原动机输入的有功功率（即调节汽轮机的进汽量或者水轮机的导水叶开度），从而调整同步发电机的功率平衡，实现控制同步发电机输出频率的目的。

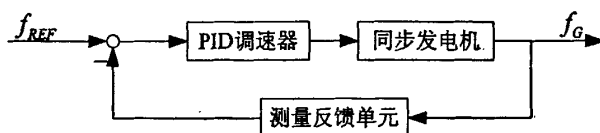


图3-1 同步发电机PID调速系统示意图

PID控制器，即Proportional-Integral-Differential Controller，它是比例、积分和微分控制的简称。PID控制系统能被广泛应用和发展，根本原因在于这种控制系统满足实际控制的应用需求和具备应用实现的条件。PID控制结构简单、调试方便，用一般电子线路、电气机械装置很容易实现，比其他复杂控制方法具有可实现的优先条件。特别是计算机进入控制领域以来，用数字计算机代替模拟计算机调节器组成计算机控制系统，不仅可以用软件实现PID控制算法，而且可以利用计算机的逻辑功能，使PID控制更加灵活。

在当今应用的工业控制器中，半数以上采用了PID或变形PID控制方案。PID控制是将偏差的比例、积分和微分通过线性组合构成控制量对被控对象进行控制。PID算法的原理框图如图3-1所示。

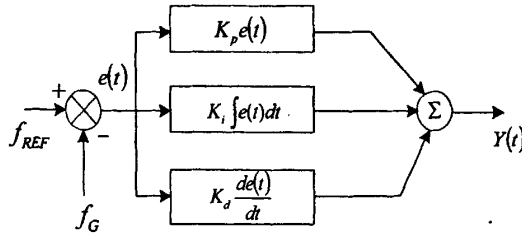


图 3-2 PID 算法的原理框图

PID 算法的时域表达式为:

$$Y(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

式中: $Y(t)$ ——转速变化的输出;

$e(t)$ ——转速偏差信号, $e(t) = f_{REF} - f_G$;

其中 K_p 、 T_i 、 T_d ——分别为比例系数, 积分、微分时间常数;

f_{REF} ——发电机转速设定值(基准值);

f_G ——发电机转速测量值。

在计算机控制系统中, 使用的一般是数字 PID 控制器, 这种控制器用差分方程代替微分方程进行离散化, 因此上式中的积分和微分项用数值计算的方法逼近。在采样时刻 $t = kT$ (T 为采样周期), 可得

$$Y(k) = K_p \left\{ e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=1}^k e(j) + \frac{T_d}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\}$$

式中 $k(k=0,1,2,\dots)$ 为采样编号, $Y(k)$ 为第 k 次采样时刻的计算机输出值, $e(k)$ 为第 k 次采样时刻输入的偏差值, $e(k) = f_{REF} - f_G(k)$, $e(k-1)$ 为第 $k-1$ 次采样时刻输入的偏差值。因为这种算法的输出信号为执行机构的位置, 所以这种算法称为位置式 PID 算法。如果采样周期 T 足够小, 这种逼近相当准确。

上式表示的算法提供了执行机构的位置 $Y(k)$, 所以称为位置式 PID 算法。如采样周期 T 足够小, 这种逼近相当准确。当需要的不是控制输出的实际值而是其增量时, 上式中的 k 用 $(k-1)$ 置换, 并将两式相减, 可以推导出:

$$\begin{aligned} \Delta Y(k) &= Y(k) - Y(k-1) \\ &= K_p \left\{ [e(k) - e(k-1)] + \frac{T}{T_i} e(k) + \frac{T_d}{T} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \right\} \\ \therefore Y(k) &= Y(k-1) + \Delta Y(k) \\ &= Y(k-1) + K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \end{aligned}$$

式中 K_i ——积分系数, $K_i = K_p \frac{T}{T_i}$;

K_d ——微分系数, $K_d = K_p \frac{T_d}{T}$ 。

增量式计算误差或精度对控制量的影响较小,且增量算式只与最近几次的采样值有关,所需内存也少,因此在实际程序应用中增量式算法更为广泛^[49, 50]。

PID 参数对控制系统性能的影响

(1) 比例调节,按频率偏移的大小,控制调速器按比例增减机组功率。这种调频方式只能减小,而不能消除系统频率偏移。

(2) 积分调节,按频率偏移对时间的积分来控制调速器。这种方式可以实现无差调节,但负荷变动的最初阶段,因控制信号不大而延缓了调节过程。

(3) 微分调节,按频率偏移对时间的微分来控制调速器。在负荷变动最初阶段,增减调节较快,但随着时间推移,频率偏差趋于稳定时,调节量也就趋于零,在稳态时它就不起作用。

PID 控制器的参数整定问题从运筹学的角度来讲,就是调整控制器的参数,满足一定的约束条件下,使某个目标函数达到最优。寻求 PID 控制最优参数是利用计算机的快速运算和强大的逻辑判断能力,按照选定的寻优策略,不断探测、调整,自动寻找最优的数字 PID 控制器参数,使得系统状态处于最优。PID 控制器参数优化方法主要有两种途径:一种是基于现代控制理论的整定方法,写出目标函数的解析式,然后根据目标函数取极值的充分必要条件,求出控制器参数的最优解。二是采用一种寻优算法,即直接在参数空间中按照一定寻优策略进行寻优,寻得的参数即为最优的参数值。本文用的是第二种寻优方式。

3.3 基于粒子群算法的同步发电机调速器设计

3.3.1 粒子群算法

自然界中一些生物的行为呈现群体特征,可以用简单的几条规则将这种群体行为 (Swarm Behavior) 在计算机中建模,实际上就是在计算机中用简单的几条规则来建立个体运动模型,但这个群体的行为可能很复杂。例如,Reynoldas 是用了下列三个规则作为简单的行为规则^[41]:

- 1) 线别离最近同伴的方向运动;
- 2) 向目的运动;
- 3) 向群体的中心运动。

这即是著名的 Boid (Bird-oid) 模型。在这个群体中每个个体的运动都遵循

这三条规则,通过这个模型来模拟整个群体的运动。PSO 算法的基本概念也是如此,每个粒子的运动可用几条规则来描述,因此算法简单,容易实现,越来越多地引起人们的注意。

PSO 算法源于对鸟群觅食行为的研究。研究者发现鸟群在飞行过程中经常会突然改变方向、散开、聚集,其行为不可预测,但其整体总保持一致性,个体与个体之间也保持着最适宜的距离。通过对类似生物群体的行为的研究,发现生物群体中存在着一种社会信息共享机制,它为群体的进化提供了一种优势,这也是 PSO 算法形成的基础。

设想这样一个场景:一群鸟在随即搜寻食物,在这个区域里只有一块食物,所有的鸟都不知道食物在哪里,但是它们知道当前的位置离食物还有多远。那么找到食物的最优策略是什么呢。最简单有效的就是搜寻目前离食物最近的鸟的周围区域。

PSO 算法就从这种生物种群行为特性中得到启发并用于求解优化问题。在 PSO 中,每个优化问题的潜在解都可以想象成 d 维搜索空间上的一个点,这些点被称之为“粒子 (Particle)”,共有 m 个粒子组成一个群体。每个粒子性能的优劣程度取决于待优化问题目标函数确定的适应值 (fitness value),每个粒子有一个速度决定其飞行的方向和速率的大小,粒子们追随当前的最优粒子在解空间中进行搜索。PSO 初始化为一群随机粒子 (随机解),然后通过迭代找到最优解。其中,在第 t 次迭代时,粒子 i 的位置可以表示为 $X_i(t) = (X_{i1}(t), X_{i2}(t), \dots, X_{id}(t))$,该粒子的飞行速度可以表示为 $V_i(t) = (V_{i1}(t), V_{i2}(t), \dots, V_{id}(t))$ 。在每一次迭代过程中,粒子跟踪两个“极值”来更新自己的速度和位置。第一个就是粒子本身所找到的最优解,这个解叫做个体极值 p_{Best} ,可以表示为 $P_i(t) = (P_{i1}(t), P_{i2}(t), \dots, P_{id}(t))$;另一个极值是整个种群目前找到的最优解,这个极值是全局极值 g_{Best} ,可以表示为 $P_g(t) = (P_{g1}(t), P_{g2}(t), \dots, P_{gd}(t))$ 。

在第 $t+1$ 次迭代计算时,粒子 i 根据下列规则来更新自己的速度和位置。

$$V_{ik}(t+1) = wV_{ik}(t) + c_1r_1(P_{ik}(t) - X_{ik}(t)) + c_2r_2(P_{gk}(t) - X_{ik}(t)) \quad (3-1)$$

$$X_{ik}(t+1) = X_{ik}(t) + V_{ik}(t+1) \quad (3-2)$$

其中, w 为权重系数; c_1, c_2 为非负常数 (通常情况下, $c_1=c_2=2.0$); r_1, r_2 为 $(0, 1)$ 之间的一个随机数, $k=1, 2, \dots, d$ 。

公式(3-1)主要通过三部分来计算粒子 i 新的速度:粒子 i 前一刻的速度,粒子 i 当前位置与自己最好位置之间的距离,粒子 i 当前位置与群体最好位置之间的距离。如果从社会学的角度来看,公式(3-2)的第一部分称为记忆项,表示上次速度大小和方向的影响;公式的第二部分称为自身认知项,是从当前点指向此粒子自身最好位置的一个矢量,表示粒子的动作来源于自己经验的部分;公式的

第三部分称为群体认知项，是一个从当前点指向种群最好点的一个矢量，反映了粒子间的系统合作和知识共享。图 3-3 中，以两维空间为例描述了粒子位置转移的原理。

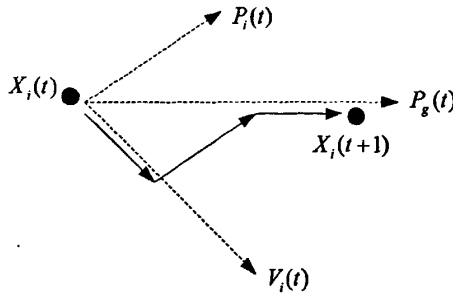


图 3-3 粒子群算法原理图

公式的后两部分是导致粒子速度变化的两项。一方面，公式(3-1)如果没有后两项，粒子将保持在相同的方向上以当前的速度“飞翔”至下一个点，直至达到边界值。这样的 PSO 将不能找到一个可接受的解，除非这样的飞行轨迹是一种合理的方案，而这在现实中是非常罕见的。

另一方面，如果公式(3-1)没有第一项，那么“飞翔”粒子的速度仅仅取决于粒子的当前位置和它们最好的历史。速度自身是没有记忆性的。假设在开始的时候，粒子 i 正好是整体最好所在的点，那么粒子 i 将以速度为 0 “飞翔”，这将保持粒子此次的位置不变，直到出现新的一个最好点替代粒子 i 。同时，每一个粒子将向自身最好点和整体最好点的质心方向“飞翔”。在这种状况下，各个粒子逐渐的像最好的位置处收缩，直到出现新的最好值，而那样粒子群体又向这个位置收缩。因此可以想象，在没有第一项情况下的 PSO 搜索过程，其搜索空间将在迭代逐渐衰退，这类似于局部搜索算法。只有当全局最好点包含在初始搜索空间内的时候，才有可能找到满意解。这样，最终解在很大程度上要依赖于初始化种群。这也说明了在没有第一项内容的情况下，PSO 算法更多的显现的是局部搜索能力。从另一层意思来说，第一项内容使得粒子有一种扩展搜索空间能力，即开拓能力，是一种全局搜索能力的表现。

在各类问题的解决，局部搜索和全局搜索都起着重要作用。对于某一类优化问题的具体解决中，我们应该权衡局部搜索和全局搜索的贡献。公式(3-1)中的惯性权重因子 w 就是考虑到全局搜索和局部搜索能力的权衡而设定的。

3.3.2 基于粒子群算法的调速器的结构

基于粒子群算法的同步发电机最优调速系统的结构如图3-4所示。该调速系

统由调速器，同步发电机和测量反馈单元组成。调速器选取为PID控制器。本节采用粒子群算法对PID控制器的控制参数进行离线整定。

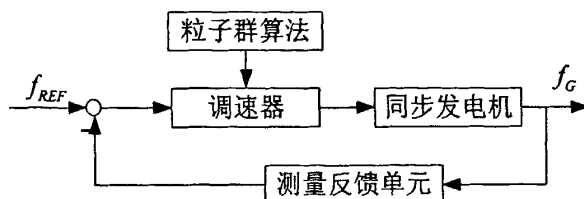


图3-4 基于粒子群算法的同步发电机最优调速系统结构图

在算法优化的过程中，要确定一个目标函数，通过粒子群算法搜索出的参数应该使该目标函数大到最小或者最大，即系统具有最优的性能指标。在本文的研究中，为了使研究结果直观，目标函数选取为被控对象输出频率与基准频率的差值的绝对值之和，即使得被控对象的输出频率快速的恢复到基准值。

$$F = \sum_{i=0}^T abs(\Delta f_i)$$

3.3.3 粒子群优化算法的流程

为便于判断混沌算法的优化效果，本文设计了基于基本粒子群算法的调速控制器来进行比较分析。

基本粒子群算法优化调速控制器参数的流程如图 3-5 所示。

对于基本粒子群算法优化 PID 控制器参数流程的简要说明：

(1) 粒子群中粒子个数为 popsize=50; c_1 、 c_2 为学习因子，本文中按照经验值设定为 $c_1 = c_2 = 2$; 约束因子 $\alpha = 0.9$ 。

(2) 流程图中 k 表示迭代次数，本文中设定的最大迭代次数为 $k_{max} = 100$ ，即 k 的取值范围是 $[1, 100]$; 表示粒子数的 j 取值范围为 $[1, popsize]$ ，即 $[1, 50]$ 。

(3) 设定 $k=1$ ，以 k 来标志粒子群算法的迭代次数。

(4) 根据公式 (3-3) 计算惯性权重 ω^t ， $\omega_{max} = 0.9$ ， $\omega_{min} = 0.4$ 。 $iter_{max}$ 为最大进化代数， ω_{max} 和 ω_{min} 为 ω^t 取值的范围。

$$\omega^t = \omega_{max} - \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{iter_{max}} \cdot k \quad (3-3)$$

(5) 设定 $j=1$ ，以 j 来标志粒子群中的粒子数量。

(6) 在每次迭代过程中，针对每个粒子，根据公式(3-4)和公式(3-5)更新其位置和速度。

$$v(j,:) = \omega^t v(j,:) + c_1 r_1 (pbest(j,:) - pop(j,:)) + c_2 r_2 (Gbest(j,:) - pop(j,:)) \quad (3-4)$$

$$pop(j,:) = pop(j,:) + \alpha v(j,:) \quad (3-5)$$

其中 j 为粒子标号。

(7) $j \leftarrow j+1$, 如果 $j=50$, 则意味着整个粒子群全部完成一次更新, 转步骤(8), 否则, 转步骤(6)。

(8) 通过比较粒子群中所有粒子的目标函数, 确定这一次迭代过程中的全局最优解, 即所有粒子中所对应的目标函数最优的粒子。

(9) $k \leftarrow k+1$, 如果 $k < k_{max}$, 则输出最优解, 程序结束。否则, 转步骤(4)。

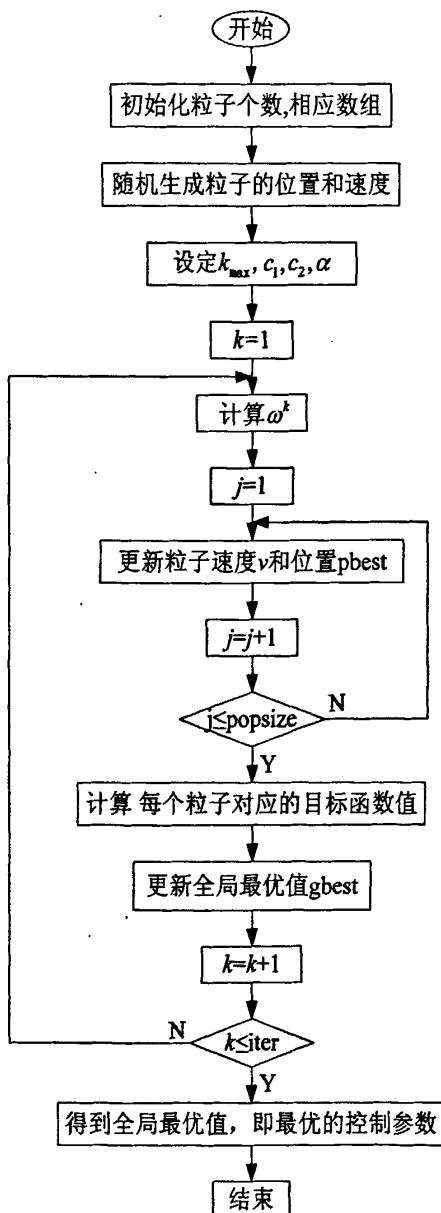


图 3-5 粒子群算法的优化流程

在优化过程中,粒子的每个位置对应于每个局部最优解,即局部最优参数,而种群的最优位置是局部最优位置中最好的,是全局最优解,即全局最优参数。在本文中粒子位置由三维坐标表示出来,因为要优化的参数是三个。每个粒子位置的优劣是根据目标函数的大小判断的,目标函数的值越小,说明参数越优。粒子群算法也有一定的缺点,保证一定能找到最优解,由于PSO在优化过程中存在两个问题:首先,由于整个粒子群都是根据全体粒子和自身的经验向着最优解的方向“飞行”,在较大的动量系数作用下,粒子有可能错过最优解,在远离最优解的空间中发散,使算法不能收敛;其次,在算法收敛情况下,由于所有的粒子都向着最优解的方向搜索,所以所有的粒子趋向同一,失去解的多样性,使得后期收敛速度明显变慢,同时算法收敛到一定精度时,算法无法继续优化,算法所能达到的精度比遗传算法要低。因而要对粒子群算法进行一定的改进才能取得更好的控制效果。

3.4 基于混沌粒子群算法的同步发电机调速器设计

3.4.1 混沌搜索的原理

混沌,是当今举世瞩目的前沿课题及学术热点,它揭示了自然界以及人类社会中普遍存在的复杂性,有序性与无序性的统一,确定性与随机性的统一,大大开拓了人们的视野,加深了人类对客观世界的认识。1963年,麻省理工学院的气象学家 Lorenz 在大气对流确定性模型中发现了非周期,看起来混乱,类似随机过程的行为。之后又有许多科学家都在各自的领域发现了“确定性系统中的内在随机性”现象。这种内在随机性后来被人们称为混沌现象。

混沌是指在发生在确定系统中貌似随机的不规则运动。混沌系统由确定性的迭代式产生,能够不重复的历经一定范围内的所有状态,是一种介于确定性和随机性之间的系统。混沌的遍历性特点可作为避免搜索过程落入局部极小的一种优化机制。一般认为当系统具有下列数值特征时则发生了混沌:(1)系统的运动轨迹为奇怪吸引子现象;(2)系统运动的功率谱具有连续谱上叠加有尖峰的特点;(3)系统中至少有一个李雅诺夫指数 $\lambda > 0$ ^[33]。

混沌的定义:设连续自映射 $f: I \rightarrow I \subset R$, I 是 R 中的一个子区间。如果存在不可数集合 $S \subset I$ 满足:(1) S 不包含周期点;(2)任给 $X_1, X_2 \in S (X_1 \neq X_2)$, 有 $I: \limsup_{i \rightarrow \infty} |f^i(X_1) - f^i(X_2)| > 0$; $\Pi: \liminf_{i \rightarrow \infty} |f^i(X_1) - f^i(X_2)| = 0$;(3)任给 $X_1 \in S$ 及 f 的任意周期点 $P \in I$ 有 $\limsup_{i \rightarrow \infty} |f^i(X_1) - f^i(P)| > 0$; 则称 f 在 S 上是混沌的^[3]。

根据 Logistic 映射表达式

$$t^{n+1} = \mu t^n (1 - t^n), n = 0, 1, \dots, N, 0 < t^n < 1, \mu \in [0, 4] \quad (3-6)$$

当 $\mu = 4$ 时, 轨道 $t^n (0, 1, \dots, N)$ 为混沌的, 即 Logistic 映射完全处于混沌状态^[34]。随机取一初值 $t^0 (\{t^0 | t^0 \in (0, 1) \cup t^0 \neq 0.25 \cup t^0 \neq 0.50 \cup t^0 \neq 0.75\})$, Logistic 映射的混沌轨道如图 3-6 所示。

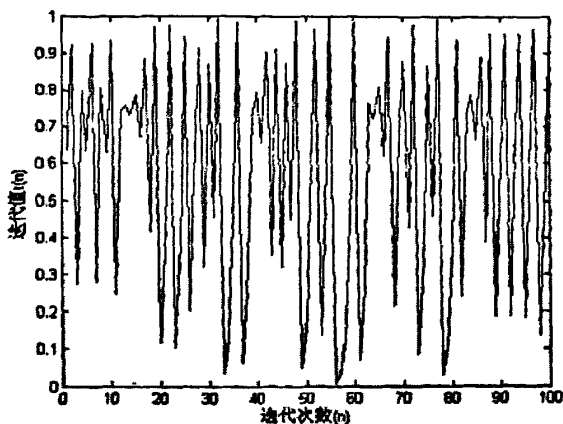


图 3-6 $\mu = 4$ 时 Logistic 映射的混沌轨道

此时, 从理论上来说 t^n 经过 N (N 值必须足够大) 次的迭代后, 能遍历区间 $(0, 1)$ 的所有值, 如图所示, 以 $t^0 = 0.4363$ 为初始点, 迭代 1500 次, 得出一个混沌序列 $\{t^k\}$, 图中的黑点表示迭代第 k 次时 t^k 的值。

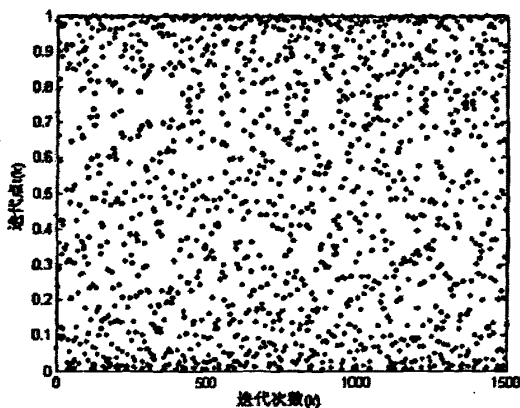


图 3-7 Logistic 映射的遍历性

从图 3-7 中可以看出, 在迭代次数足够多的情况下, 序列 $\{t^k\}$ 几乎能遍历整个 $(0, 1)$ 区间。混沌优化算法正是基于这一遍历性能搜索到全局最优值。

混沌优化在实际控制工程中的应用主要表现在优化控制参数。用混沌优化方

法求解优化问题 $\min f(x)$ ，寻优变量 x 一般都有一定的取值范围，故需构造混沌变量 t 与寻优变量 x 取值区间的映射关系。本文的算法使用 $x=c+dt$ 的映射形式，其中 c 、 d 是当混沌变量在区间 $(0, 1)$ 遍历时寻优变量 x 均能在指定范围内变化的常向量。

混沌的典型特征如下：

(1) 非线性。只有非线性系统才可能产生混沌现象。

(2) 确定性。系统状态的演变遵循的准则是确定的。

(3) 对初始值的敏感依赖性。初始状态的微小变化会造成系统轨迹的指数速度分离。这意味着随着时间的推移，任意靠近的各个初始条件将表现出各自独立的时间演化。

(4) 不可预测性。由于系统对初始值的敏感性，导致系统的长期行为不能进行确定的描述，只能用概率方法来进行描述。

(5) 无序中的有序性。混沌运动中周期点集的稠密性，决定了系统内部高低频率成分竞争的有序性。

混沌的发现，对科学的发展具有空前深远的影响。近年来，混沌控制^[44]、混沌^[45]和混沌神经网络^[46]受到了广泛的关注，并展现出诱人的应用于发展前景。混沌搜索方法是混沌应用研究的一个崭新方向。混沌搜索利用混沌运动规律的随机性，遍历性和规律性寻找最优点，是一种新型的优化算法。其结构简单，中间操作少，有较高执行效率。混沌搜索算法遍历性的特点使得算法在搜索过程中可以有效地避免陷入局部最优解。且该算法不需要知道目标函数的导数信息，只依赖于对目标函数的重复求值运算，有较高的精确性。由于算法的上述特点，它受到广泛重视，相关学者也进行了大量研究。但是混沌算法也存在明显的缺点，即当搜索起始点选择不合适或遍历区间很大或控制参数及其控制策略选取不合适时，搜索结果很难达到或接近最优解，或者说算法可能需要花费很长的时间才能取得较好的优化性能。因此，为了使混沌优化算法具有更为卓越的性能，如何选择搜索起点、如何缩小搜索空间、如何设计限局部搜索方式、如何设计好两个阶段的中止准则、如何选取合适的初始控制参数及其控制策略，仍是提高上述基于混沌动态的优化算法性能的关键^[36]。

3.4.2 混沌粒子群算法的原理

PSO 根据粒子速度来决定搜索路径，且沿着梯度方向搜索，搜索速度快；在大多数情况下，所有的例子可能更快的收敛于最优解；PSO 采用实数编码，可直接取目标函数本身作为适应度函数，根据目标函数值进行迭代搜索；PSO 的各粒子间信息交流采用单向的信息流动方式，整个搜索更新过程是跟随当前最优解的过程；PSO 的各粒子具有记忆性，使得领域算子不能破坏已搜索到的较优解；

PSO 需要的调节参数不多,尤其是算法引入收敛因子后,完全可按照经验值设置参数即可获得较好的收敛性;粒子群算法的主要缺点是:进化后期收敛速度慢,对于过于复杂的问题可能搜索不到最优解,计算精度不高等。

混沌运动具有遍历性、随机性、“规律性”等特点,混沌运动能在一定范围内按其自身的“规律”不重复的遍历所有状态。混沌的遍历性特点了被用来进行优化搜索且能避免陷入局部极小,因此,混沌优化搜索方法已成为一种新颖的优化技术,混沌优化就是根据其遍历性和“规律性”特点采用混沌变量在一定范围内进行搜索,促使混沌变量的搜索跳出局部极小点,最终达到全局最优点。但是混沌搜索对初始值的依赖比较严重,初始值的选取在很大程度上影响优化的效果。

3.4.3 基于混沌粒子群算法的调速器的结构

本文采用的混沌粒子群优化算法,是一种将粒子群算法和混沌算法组合在一起的方法,该方法充分利用粒子群算法运算简单、早期收敛速度快和混沌算法遍历性的特点。该算法的主要思想是:以基本的粒子群算法为主体流程,在运用粒子群算法进行群体搜索,得到这一次迭代的全局最优解,在此基础上,采用混沌算法对这一全局最优解进行二次寻优,通过比较目标函数,确定这一次迭代过程中的全局最优解,并以此全局最优解为基础进行下一次的迭代。混沌粒子群算法可以有效克服传统粒子群算法易陷入局部极小值和后期收敛速度慢的缺点和混沌算法搜索空间大,收敛速度慢的缺点。本文将混沌粒子群算法用于同步发电机调速器的设计,旨在设计出性能更好的控制器,从而使电力系统有更稳定的频率。

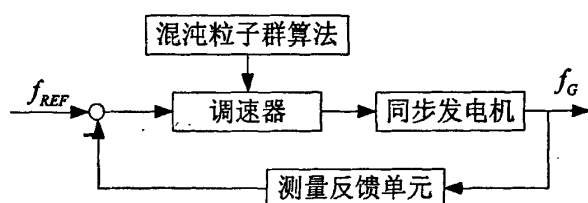


图3-8 基于混沌粒子群算法的同步发电机最优调速系统的结构

基于混沌粒子群算法的同步发电机最优调速系统的结构如图3-8所示。该调速系统由调速器,同步发电机和测量反馈单元组成。当系统出现扰动或者故障时,同步发电机的转速发生变化,测量反馈单元检测到频率的变化,将频率反馈与基准频率进行比较,将偏差输入到调速器当中,调速器根据频率偏差调整进入同步发电机平衡,最终实现对同步发电机输出频率的控制。在本文,调速器选取为PID控制器。本节采用混沌粒子群算法对PID控制器的控制参数 K_p 、 K_I 、 K_D 进行优化。在优化的过程中,参数的性能优劣以目标函数为依据,通过比较目标函数的

大小, 确定一组使目标函数最小的控制参数, 即为最优参数。和基于粒子群算法的控制器相比, 目标函数的选取是相同的, 两种控制系统的区别主要体现在参数优化方法方面。在优化过程当中, 混沌粒子群算法加入了混沌搜索的部分, 使得整个算法有更好的优化效果, 即可以得到性能更好的控制参数。在实际的控制应用中, 优化算法是对参数实行离线整定的, 即通过仿真模拟电力系统的扰动和短路故障, 优化得到针对相应情况的优化参数。在实时控制时, 根据实际系统的情况, 人工或者自动切换到相应的参数, 然后进行控制。在本节的研究中, 目标函数选取为被控对象输出频率与基准频率的差值的绝对值之和, 即:

$$F = \sum_{t=0}^T \text{abs}(\Delta f_t)$$

3.4.4 混沌粒子群优化算法的流程

混沌粒子群算法优化发电机最优调速器参数的流程如图 3-9 所示。

优化过程说明如下:

1. 设定粒子群中的粒子个数 $\text{popsize}=50$, 对于每个粒子, 定义数组 pop 来存放粒子每次迭代后的位置; 定义 v 用于存放每个粒子的速度; 粒子维数为 $d_{\max}=3$, 表示要优化的参数个数为三个, 分别是 K_p 、 K_I 、 K_D ; 粒子群的进化代数 $\text{iter}_{\max}=100$; 定义 pbest 为粒子局部最优位置; 定义 Gbest 为粒子全局最优位置。在算法过程中, 粒子的每个位置对应一组 K_p 、 K_I 、 K_D 参数。

2. 设定混沌算法的参数。学习因子 $c_1=c_2=2$, 控制速度权重的约束因子 $\alpha=0.9$, 惯性权重 ω 的初始值 $\omega_k=0.9$, 定义混沌优化的粒子位置为 $\text{hdpop}(1:d)$; 设定混沌搜索次数 $\text{ck}_{\max}=100$ 。

3. 随机生成 popsize 个粒子的位置 pop 和速度 v , 令迭代次数 $k=1$ 。

4. 根据公式(3-3), 计算惯性权重式中: iter_{\max} 为最大进化代数, ω_{\max} 和 ω_{\min} 为 ω^k 取值的范围, 本文中, 根据经验值设定 $\omega_{\max}=0.9$, $\omega_{\min}=0.4$ 。

5. 对于种群中的每一个粒子进行操作, 并根据公式(3-4)和(3-5)更新每个粒子的位置 pop 和速度 v 。比较粒子群中所有粒子的目标函数值, 得出这次迭代过程中产生的全局最优解, 其速度和位置分别记为 v_k 和 pop_k 。这一粒子以 g 标志, 所对应的变量为 x_{gk} 。

为保证计算后的结果在允许范围之内, 规定如果 $v_k > v_{\max}$, 则 $v_k = v_{\max}$, 如果 $v_k < v_{\min}$, 则 $v_k = v_{\min}$; 同样, 如果 $\text{pop}_k > \text{pop}_{\max}$, 则 $\text{pop}_k = \text{pop}_{\max}$, 如果 $\text{pop}_k < \text{pop}_{\min}$, 则 $\text{pop}_k = \text{pop}_{\min}$ 。其中 v_{\max} 和 v_{\min} 为 v_k 的取值范围; 而 pop_{\max} 和 pop_{\min} 为 pop_k 的取值范围。

6. 在区间(0,1)内任取值 $\text{rand}(0,1)$, 根据公式(3-7)计算 P_k , 比较 $\text{rand}(0,1)$ 和 P_k 的大小, 如果 $\text{rand}(0,1) \leq P_k$, 则按照以下步骤进行混沌搜索, 否则转到步骤 7。

调用混沌搜索的概率计算公式如下:

$$P_k = 1 - \frac{1}{1 + \ln(k)} \quad (3-7)$$

其中 k 为迭代的次数。在算法开始, P_k 值较小, 整个程序以粒子群算法为主, 以很小的概率调用混沌搜索, 从而更好地保证搜索的速度。随着迭代次数的增加, k 值增大, 即 P_k 越来越趋近于 1, 算法以更大的概率采取混沌搜索。这主要是因为算法搜索的初期, 粒子群算法搜索速度快, 且具有很好的收敛性, 只采用粒子群算法就可以获得较好的搜索效果, 但是随着搜索的进行, 到进化后期, 粒子群搜索收敛性越来越慢, 因而越来越多的采用混沌搜索。这样, 在整个搜索寻优的过程之中既充分发挥了粒子群算法的搜索速度快, 简单容易实现的优点, 又在进化后期有效改进了粒子群算法, 使得最后不至于收敛到局部最优值。

混沌搜索步骤如下:

- (1) 令 $d=1$;
- (2) 对粒子 g 中变量 x_{gdk} 进行混沌优化搜索, 其余 $d_{\max} - 1$ 个变量保持不变。

混沌优化过程如下:

- (a) 令 $x_{dl} = x_{gdk}$;
- (b) 按照下式将 x_{dl} 归一化成 $[0, 1]$ 区间的值, a, b 为优化变量的取值范围;

$$cx_{dl} = \frac{x_{dl} - a}{b - a}$$

- (c) 对 cx_{dl} 进行混沌搜索: $l \leftarrow l + 1, cx_{dl} \leftarrow 4cx_{dl}(1 - cx_{dl})$;
 - (d) 将 cx_{dl} 按照公式 (3-8) 线性映射到优化变量的取值区间 $[a, b]$, 得到 rx_{dl} ;
- $$rx_{dl} \leftarrow a + (b - a) \cdot cx_{dl} \quad (3-8)$$
- (e) 令 $x_{dl} \leftarrow x_{dl} + \beta \cdot rx_{dl}$, 若 $f(x_{dl}) < f^*$, 则 $f^* = f(x_{dl})$, $x_{dl} = x_{dl}^*$ 。其中 f^* 为当前最优解, x_{dl}^* 为当前得到的最优变量, β 为一个很小的常数;
 - (f) 重复步骤(b)、(c)、(d)、(e), 直到一定步数内 f^* 保持不变或者达到最大给定搜索步数 ck_{\max} , 结束混沌搜索, 返回 $x_{gdk} = x_{dl}$ 。

(3) $d \leftarrow d + 1$, 如果 $d > d_{\max}$, 则结束混沌搜索, 否则转步骤 (2) 对下列一个变量进行混沌搜索。

7. 计算目标函数, 确定全局最优值。

8. 如果 $k < k_{\max}$, 则 $k \leftarrow k + 1$, 转步骤 4, 如果 $k = \text{iter}_{\max}$, 则输出全局最优值 (即最优的 K_p 、 K_I 、 K_D), 程序结束。

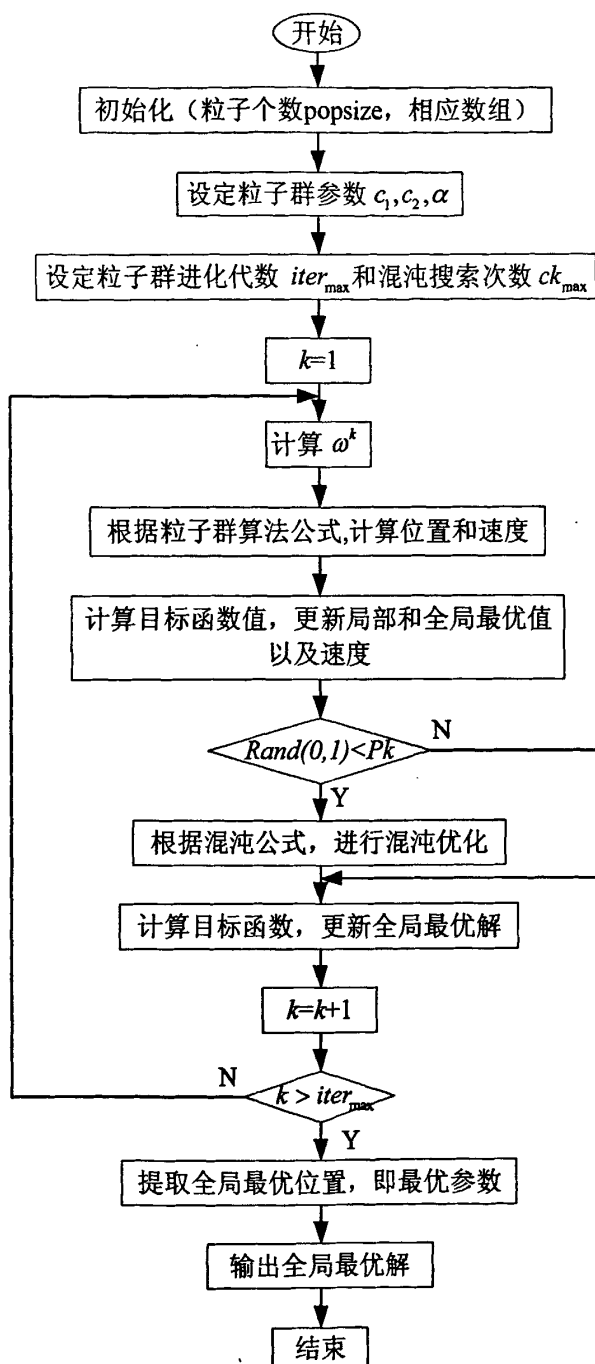


图 3-9 混沌粒子群算法流程图

3.5 仿真分析

为了验证本文所设计的基于混沌粒子群算法的调速控制器的控制效果,本文采用了 MATLAB 语言编写程序,应用基于混沌粒子群算法的调速控制器,基本粒子群算法的调速控制器分别进行调速控制,对所得到的控制结果进行比较分析。

本文在研究再热式汽轮发电机组调速控制系统的问题中,假定发电机已采用了性能优良的励磁控制器,使得在整个动态过程中保持 q 轴的电势 E'_q 恒定。则带有调速系统的发电机微分方程可用下式表示:

微分方程标准形式 $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U}$, 则

$$\dot{\mathbf{X}} = [\Delta f \quad \dot{Y}_2 \quad \Delta P_G \quad \Delta P_M]^T$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_p} & 0 & 0 & \frac{1}{T_p} \\ -(K_1+K_2)K_I & 0 & 0 & 0 \\ \frac{(K_1+K_2)(K_D-K_P T_p)}{T_S T_p} & \frac{1}{T_S} & -\frac{1}{T_S} & -(K_1+K_2)\frac{K_D}{T_S T_p} \\ \frac{(K_1+K_2)K_H(K_D-K_P T_p)}{T_S T_p} & \frac{K_H}{T_S} & \frac{T_S-T_{RH}}{T_S T_{RH}} & \frac{(K_1+K_2)K_H K_D T_{RH} + T_S T_p}{T_S T_p T_{RH}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X} = [\Delta f \quad Y_2 \quad \Delta P_G \quad \Delta P_M]^T$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_p} & 0 & 0 \\ 0 & K_1 K_I & K_I \\ (K_1+K_2)\frac{K_D}{T_S T_p} & \frac{K_1 K_P}{T_S} & \frac{K_P}{T_S} \\ (K_1+K_2)\frac{K_H K_D}{T_S T_p} & \frac{K_1 K_H K_P}{T_S} & \frac{K_H K_P}{T_S} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{U} = [\Delta P_e \quad \Delta f_{Gd^*} \quad \Delta P_{Gd^*}]^T$$

本文的参数选取如下:

$$K_1 = 0.05, K_2 = 0.1, T_p = 10, K_H = 0.03, T_{RH} = 10, T_S = 0.2,$$

本文仿真过程中选择单机无穷大系统进行验证和分析,单机无穷大系统的仿真模型如图 3-10 所示。

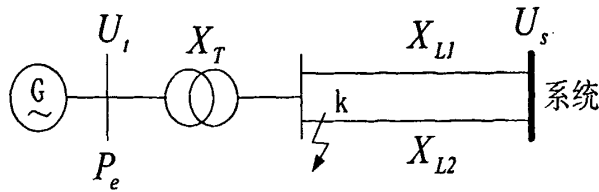


图 3-10 单机无穷大系统

其中 X_d ——发电机 d 轴同步电抗；

U_i ——发电机端电压；

X_T ——变压器电抗；

U_s ——系统电压；

X_{L1} 、 X_{L2} ——线路电抗。

采用的系统参数组合如下：

无穷大系统母线电压： $V_s = 1$ ；

同步发电机 d 轴同步电抗 $x_d = 2.543$ ；

双回输电线电抗 $x_l = 0.5 \times 1.46 = 0.73$ ；

发电机时间常数 $T_{d0} = 10s$ ；

变压器电抗 $x_T = 0.01$ ；

本文选取的粒子群算法及优化算法的参数如下：

种群数量 $\text{popsize} = 50$ ；粒子维数 $\text{dimsize} = 3$ ；粒子的进化代数 $\text{iter}_{\max} = 500$ ；

学习因子 $C_1 = 2$ ， $C_2 = 2$ ；速度约束因子 $\alpha = 0.9$ ；惯性权重的取值范围 $\omega_{\max} = 0.9$ ， $\omega_{\min} = 0.4$ ；混沌的最大迭代次数 ck_{\max} 。

机械扰动实验

系统在原初始运行点运行时，假定系统因为某种原因（如系统负荷发生变化等），使得系统的状态变量从原平衡点变化到一组新的初始点上，即将初值设为 $\Delta P_e = 0.1$ ， $\Delta f_{Gd^*} = 0$ ， $\Delta P_{Gd^*} = 0$ ， X 为一个零矩阵。分别用传统 PID 调速控制器，基于粒子群算法的调速控制器和基于混沌粒子群算法的调速控制器的进行调节，通过仿真，得到整个过程的频率随时间变化的相应曲线，如图 3-11 和图 3-12 所示，算法的相关参数和图形的相关注释如表 3-1 所示。目标函数随时间变化曲线如图 3-13 所示。本文的目标函数为实际转速与理想值偏差的绝对值之和。

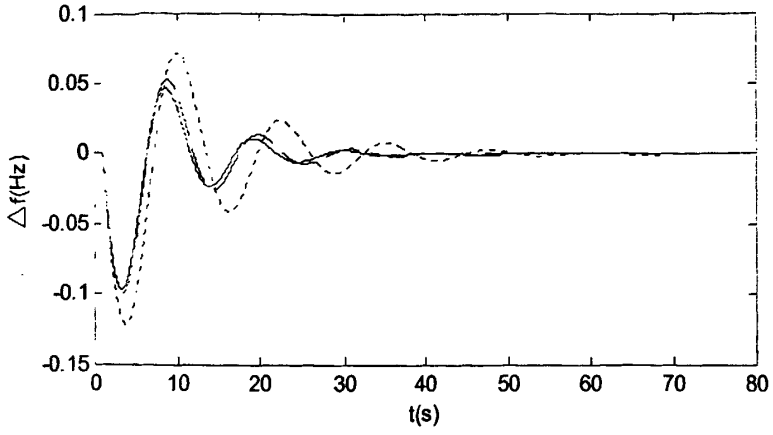


图 3-11 $P_e = 1.0$ 机械扰动响应曲线

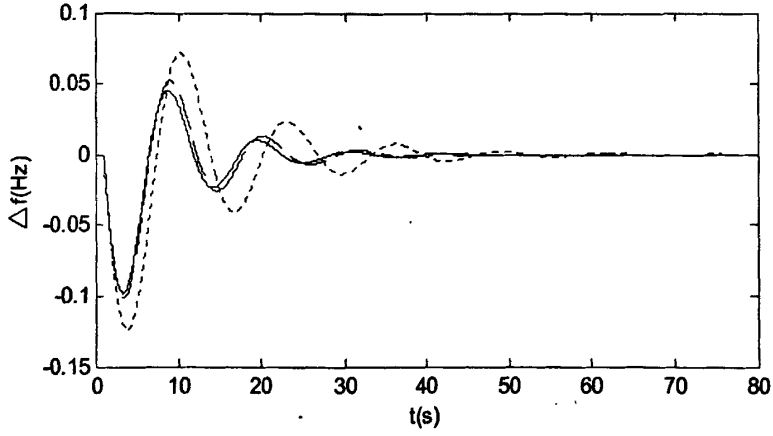


图 3-12 $P_e = 0.8$ 机械扰动响应曲线

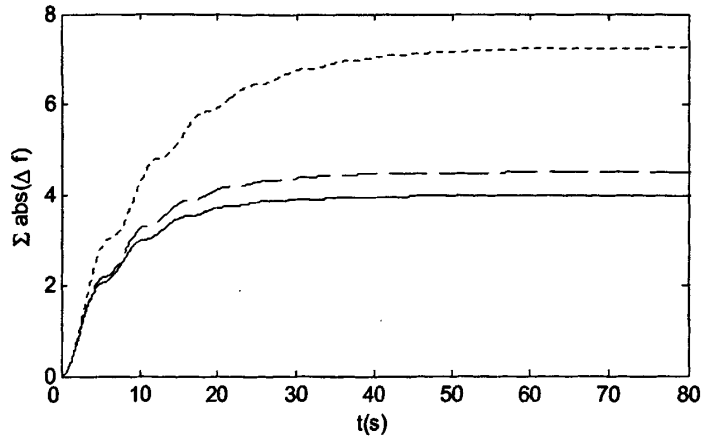


图 3-13 $P_e = 1.0$ 优化过程目标函数曲线

表 3-1 机械扰动控制相关参数

算法	线型	优化参数	目标函数	
			$P_e = 1.0$	$P_e = 0.8$
传统	点线	$K_p = 20, K_i = 2, K_d = 50$	7.2553	7.4816
粒子群	虚线	$K_p = 80.3026, K_i = 8.3881,$ $K_d = 94.5463$	4.4903	4.5976
混沌粒子群	实线	$K_p = 97.5692, K_i = 6.9763,$ $K_d = 99.7326$	3.9736	4.0543

图 3-11 所示的是系统在设计运行点 $P_e = 1.0$ 下的响应曲线，从图形中可以看出，在机械扰动情况下，三种控制器对应的频率都会产生轻微的震荡，最终达到稳定。通过三条曲线的对比可以看出，基于粒子群算法的调速控制器的调节效果无论从超调量的抑制还是调节时间上均优于传统的调速控制器，基于混沌粒子群算法的控制器则优于另外两种。通过比较表 3-1 中的三种调速器的目标函数也可以得出混沌粒子群算法的调节器略优于粒子群算法的，而明显优于传统的调节器。这说明混沌粒子群算法对全局最优解有良好的把握，也证明了混沌粒子群有效的避免了最优解过早停滞或过早收敛。图 3-12 是在运行点 $P_e = 0.8$ 下的响应曲线，由表的目标函数值可以得出，当运行工况发生变化时，传统的控制器的目标函数变化比较大，为 0.2263；基于粒子群算法的控制器变化比较小，为 0.1073；而基于混沌粒子群算法的控制器目标函数变化最小，为 0.0807。这说明基于混沌粒子群算法的调速控制器对运行工况的改变具有良好的适应性。由图 3-13 可以看出，在优化过程中，混沌粒子群算法在初期和粒子群算法的目标函数较为接近，而越到优化过程的后期，混沌粒子群算法的优点就更加明显，这主要是因为算法越到后期越多的调用混沌搜索，这也证明了混沌算法对粒子群算法的完善。

三相短路实验

为检验本文设计的基于混沌粒子群算法的调速系统的性能，进行了单机无穷大系统的三相短路故障的仿真实验。假定系统在原运行点正常运行时，此时负荷

的有功功率 P_e 由公式 $P_{e0} = \frac{E_g U}{X_{z0}} \sin \delta_0$ 计算，其中 $X_{z0} = X_d' + X_T + \frac{1}{2} X_L$ 为正常运行

状态时的线路阻抗， $\Delta P_e = P_e - P_{e0}$ 。因为某种原因在 $t=0.1s$ 时刻在靠近发电机出口侧的一回线路突然发生三相接地短路故障（故障点如图 3-10 中 k 点所示），在这一时刻由于 X_e 由 X_{z0} 突变到 X_{z1} ，因而 ΔP_e 发生突变，在短路发生到故障被切

除这段时间内的负荷有功功率按公式 $P_{e1} = \frac{E_g U}{X_{z1}} \sin \delta$ 计算。发生断路时根据正序

等效定则，应在正常等值电路中的短路点接入短路附加电抗 X_{Δ} ，此时发电机与

系统间的转移电抗 $X_{\Sigma 1} = X_{\Sigma 0} + \frac{(X_d' + X_T) \cdot \frac{1}{2} X_L}{X_{\Delta}}$ ，而发生三相短路时， $X_{\Delta} = 0$ ，

因而 $X_{\Sigma 1}$ 趋近于无穷大。在 $t=0.2s$ 时故障被切除，在 $t=0.2s$ 时刻负荷有功功率再

次发生突变，故障切除后的负荷有功功率按公式 $P_2 = \frac{E_q U}{X_{\Sigma 2}} \sin \delta$ ，其中故障线路

被切除后系统总电抗 $X_{\Sigma 2} = X_d' + X_T + X_L$ 。在整个仿真过程中负荷的有功功率有两次突变，而频率是一个渐变的过程，在求 ΔP_e 的过程当中始终以额定状态下的负荷有功功率作为基准量， Δf 的求取始终以额定转速 f_N 作为基准量。整个仿真调节过程的频率随时间变化的响应曲线如图 3-14 和图 3-15 所示。优化过程中目标函数曲线如图 3-16 所示。三种优化算法的相关参数如表 3-2 所示。

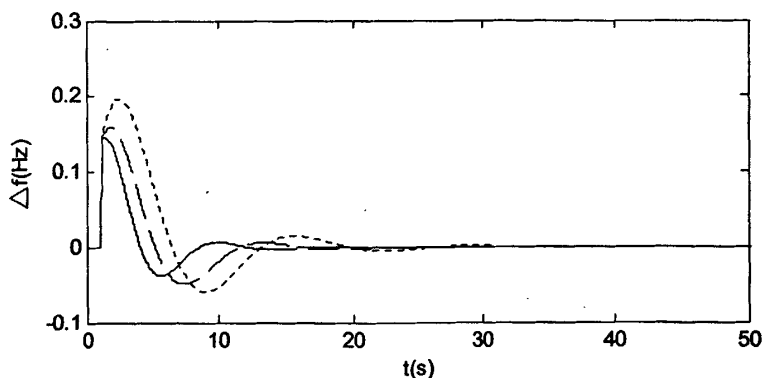


图 3-14 $P_e = 1.0$ 故障响应曲线

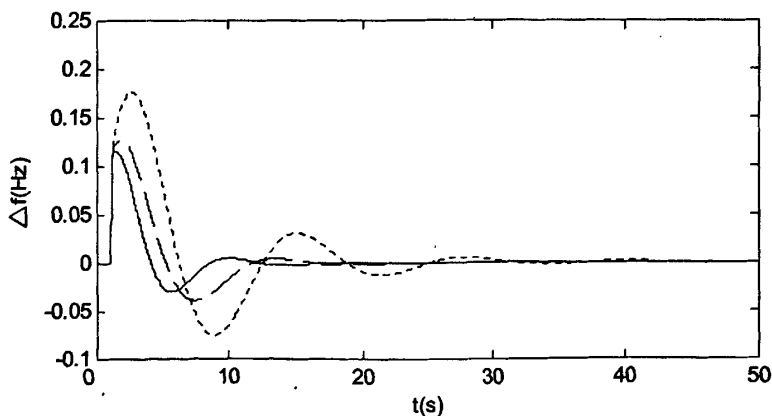


图 3-15 $P_e = 0.8$ 故障响应曲线

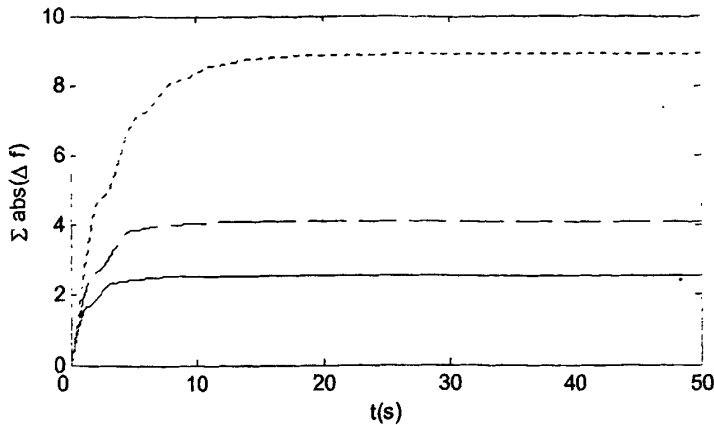


图 3-16 $P_e = 1.0$ 优化过程目标函数曲线

表 3-2 三相短路相关参数

算法	线型	优化参数	目标函数	
			$P_e = 1.0$	$P_e = 0.8$
传统	点线	$K_p = 20, K_i = 2, K_d = 50$	8.7367	7.1033
粒子群	虚线	$K_p = 46.6467, K_i = 7.6667,$ $K_d = 82.1407$	4.0159	3.2596
混沌粒子群	实线	$K_p = 98.2579, K_i = 12.1892,$ $K_d = 99.2478$	2.4867	2.0023

图 3-14 所示的是系统在设计运行点 $P_e = 1.0$ 下的响应曲线。从图 3-14 中的三条响应曲线可以看出，在系统状态突变时，传统的 PID 调节器的控制下的频率发生了一定程度的波动，不能快速收敛，调节时间过长，而在粒子群优化算法调节器的控制下，虽然频率也出现了一定的波动，但仍然可以快速收敛于稳定值，从而保证了发电机与系统并联运行的稳定性。比起基本粒子群算法，混沌粒子群算法的电压调节更加精确，保证了系统快速的恢复到稳定状态。图 3-15 所示的是 $P_e = 0.8$ 下的响应曲线，与图 3-14 对比可以看出，在这种工况下，三种算法对应的频率变化都略小，因为在第二种工况下，功率的变化幅度比较小。比较三种算法对应曲线，可以得出传统 PID 算法和基本粒子群超调量明显变大，并且频率出现了轻微波动，混沌粒子群算法的超调量变化不大，并且能够迅速的稳定频率，动态控制效果明显优于传统 PID 算法和基本粒子群算法的控制器，对运行工况的改变具有良好的适应性。由图 3-16 可见，在优化进行的初期，粒子群算法和混沌粒子群算法有几乎相等的目标函数值，但是随着优化过程的进行，混沌粒子群

算法越来越多的调用混沌算法，导致优化效果明显改善，使得两种算法的目标函数相差逐渐增大，这证明了混沌算法可以有效的完善粒子群算法。

3.6 本章小结

本章学习了粒子群优化算法的基本原理，分析了其优缺点，采用了混沌粒子群算法，设计出基于混沌粒子群算法的同步发电机调速系统最优控制器，并且通过单机无穷大系统的机械扰动和三相短路故障的仿真比较了基于传统的 PID 算法，粒子群算法以及混沌算法的调速控制器的调节效果的差异。基于混沌粒子群算法在每次迭代粒子确定全局最优解的过程中，加入了混沌的因素，由于混沌算法的遍历性的特点，使得搜索的范围更加广泛，不容易陷入局部最优解。同时，由于混沌算法的初值是由粒子群算法给定的，是基于粒子群的搜索成果，也有效避免了混沌算法由于初值的选取不合适而导致的搜索速度过慢的问题。在该优化方法的作用下，控制系统具有非常良好的动态品质和对于不同工况的适应性，在仿真技术越来越精确的前提下，混沌粒子群算法是一种效果很好的调速控制器的参数优化方法。

第四章 互联系统中调速控制系统的仿真

4.1 概述

电网区域互联是电网发展的大趋势,目前国内外的电网大部分实现了区域互联,有的还实现了国际间的互联。如美国形成了全国互联电力系统,并且与加拿大电网连接。西欧各国除各自形成全国电力系统外互联形成了西欧的国际互联电力系统,并正在通过直流背靠背与东欧国家电力系统相连。埃及能源部部长在1994年巴黎国际大电网年会开幕式上还提出了非洲、欧洲和阿拉伯国家实现跨洲联网的设想,得到与会者的重视。我国已形成东北、华北、华东、华中、西北和南方联营等6大跨省(区)电力系统,其中华东和华中电网通过葛-上±500kv直流输电线实现了跨大区电网的互联。世界上最大的水电站——三峡水电站将安装26台70万kw机组,已于1994年12月开工建设,2009年将建成发电,其中强大的电力将送往华东、华中和四川电网。它的建成发电将推动全国跨大区域电网的互联。

电网互联可以获得显著的技术经济效益。它的主要作用和优越性主要有以下几个方面:

(1) 更经济合理开发一次能源,实现水、火电资源优势互补。电力系统互联可以在煤炭丰富的矿口建设大型火电厂向能源缺乏的地区送电,可以建设具有调节能力的大型水电厂,以充分利用水力资源。

(2) 降低系统总的负荷峰值,减少总的装机容量。各个区域的日最高负荷和季节最高负荷不同时出现,互联后整个系统的最高负荷比各系统的最高负荷之和要低,峰谷差减小,有显著的错峰效益。

(3) 减少备用容量。各发电厂可轮流检修,各个电网相互支援,减少检修备用。电力系统故障时,通过联络线互相紧急支援,避免大的停电事故,减少事故备用。

(4) 提高供电可靠性。电力系统容量加大,个别环节故障对系统的影响减小,而多个环节同时发生故障的概率相对较小。

(5) 提高电能质量。电力系统负荷波动会引起频率变化。由于电力系统容量增大,供电范围,总的负荷波动比各区域的负荷波动之和要小,因此,引起系统频率的变化相对较小。同样,冲击负荷引起的频率变化要小。

(6) 提高运行经济性。各个电力系统的供电成本不相同,在资源丰富地区

建厂，其发电成本较低。实现互联电力系统的经济调度，可获得补充经济效益。

电力系统互联，由于联系增强也带来了新问题。如故障会波及相邻系统，如果处理不当，严重情况下会导致大面积停电；系统短路容量可能增加，导致要增加断路器等设备容量；需要进行联络线功率控制等。这些都要求研究和采取相应技术措施，提高自动化水平，才能充分发挥互联电力系统的作用和优越性。

本文在研究单机无穷大系统的同时也对互联系统进行了研究，比较改进前后的算法在互联电力系统中是否有较好的效果。同时研究了互联系统的一二次调频分布及网络连接中传输线上功率的变化。

4.2 互联系统中调速控制系统的仿真

区域互联是电网发展的趋势，现代电力系统的规模越来越大而且互联，即一个地区的电力系统与另一个地区的电力系统相互联结起来构成更大的系统。大型电力系统的供电幅员宽广，电源和负荷分布情况比较复杂，频率调整问题的研究也变得更加困难。因此，为了研究的方便，把整个电力系统看作是由若干个分系统通过联络线联接而成的互联系统。系统的无功功率平衡和调压问题宜于按地区解决，而全系统的频率是统一的，调频问题涉及整个系统，在研究过程中，系统的频率和功率调节以地区系统为基础作为控制区，把每个控制区作为一个等效的同步发电机群来进行调节，同时通过联络线上的功率变化，把整个电力系统中的各个区域联系起来，这可以使研究过程有效的简化。

为了得出一个通过联络线与其他控制区域相互联结的控制区 i 的调节系统传递函数。本文选取典型的三区域互联系统为研究对象。互联系统的示意图如图 4-1 所示。

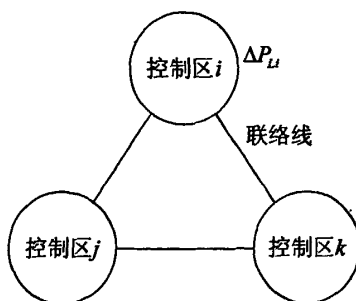


图 4-1 三区域互联系统示意图

假设控制区域 i 中，突然有一个量值为 ΔP_L 的负荷变化（机械扰动）。以控制区域 i 为研究对象，把其看作一个整体，分析区域 i 的功率的输入和输出。由

于扰动, 这个区域频率变化为 Δf_i , 调速器动作, 使得发电机组的输入功率相应变化了 ΔP_{Ti} 。在此过程中, 发电机组的输入功率与负荷变化的差值由三方面的功率来平衡: 发电机组动能提供的功率增量 (这部分主要是调速器动作的结果); 因负荷的频率调节效应而引起的负荷功率变化 (负荷的频率调节效应); 联络线上功率的变化 (互连区域间功率的流动和互补)。这种功率平衡关系可以用以下公式表示:

$$\Delta P_{Ti} - \Delta P_{Li} = dW_{ki} / dt + K_{Li} \Delta f_i + \Delta P_i \quad (4-1)$$

其中: dW_{ki} / dt ——由于发电机动能引起的功率变化, (W_{ki} 为 i 区域内发电机组的动能);

$K_{Li} \Delta f_i$ ——由于负荷调节效应引起的功率变化; (K_{Li} 为 i 区域的负荷频率调节效应系数)

ΔP_i ——区域 i 联络线上功率的变化的总和;

为建立互联系统的传递函数仿真模型, 本文主要讨论电力系统各个区域间联络线上传输的功率, 即 ΔP_i 的大小及变化。

一个区域的联络线的功率总的增量是该区域与和它相联系的区域交换的有功功率的总和, 在数值上, 它等于与该区域相联的各条联络线上传输的有功功率增量和加和, 在典型的三区域互联系统中, 联络线上的总功率可以用如下的公式表示:

$$\Delta P_i = \Delta P_{ij} + \Delta P_{ik}$$

根据电力系统分析的知识, 电力系统中两点间传输功率的公式, 得到两互联区域间联络线上的传输功率可用下式表示:

$$P_{ij} = \frac{U_i U_j}{X_L} \sin \delta_{ij} \quad (4-2)$$

式中 U_i, U_j ——传输线两端母线的电压;

δ_{ij} ——两母线电压相角之差;

X_L —— U_i, U_j 之间的电抗。

对式(4-2)进行微分化, 得到以下方程

$$\Delta P_{ij} = \frac{U_i U_j}{X_L} \cos \delta_{ij} \Delta \delta_{ij} = \frac{U_i U_j}{X_L} [\cos(\delta_i - \delta_j)] (\Delta \delta_i - \Delta \delta_j)$$

令 $P_{\max ij} = \frac{U_i U_j}{X_L}$, 称为输电线的极限传输容量,

$T_{ij} = P_{\max ij} \cos \delta_{ij}$, 称为输电线的同步系数。

则 $\Delta P_{ij} = T_{ij} \Delta \delta_{ij} = T_{ij} (\Delta \delta_i - \Delta \delta_j)$

式中 $\Delta\delta_i$ 、 $\Delta\delta_j$ ——输电线两端母线电压相角的变化量。

$$\text{因 } \Delta\delta = 2\pi \int \Delta f dt$$

$$\text{故 } \Delta P_{ij} = 2\pi \left(\int \Delta f_i dt - \int \Delta f_j dt \right)$$

控制区的总输出功率增量为

$$\Delta P_i = \Delta P_{ij} + \Delta P_{ik} = 2\pi T_{ij} \left(\int \Delta f_i dt - \int \Delta f_j dt \right) + 2\pi T_{ik} \left(\int \Delta f_i dt - \int \Delta f_k dt \right) \quad (4-3)$$

把(4-3)式化为以 P_{ie} 为基准的标幺值表示式，然后进行拉氏变换，得

$$\Delta P_{ii}(s) = \frac{2\pi}{s} T_{ij} [\Delta F_i(s) - \Delta F_j(s)] + \frac{2\pi}{s} T_{ik} [\Delta F_i(s) - \Delta F_k(s)] \quad (4-4)$$

因此关于互联系统的联络线上功率传输的传递函数框图如下：

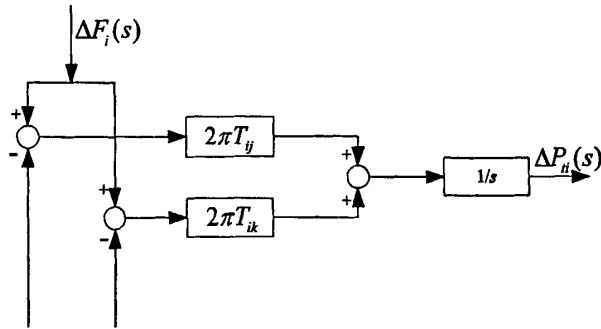


图 4-2 传输线上功率的传递函数框图

根据以上分析，以单机系统为基础，建立互联系统的传递函数图如图 4-3 所示，本文采用的为研究中广泛应用的典型的三区域系统，且假设三个区域的相关参数完全相同。为使系统简化，对发电机部分进行了封装，封装的部分为调速器，包括控制机构和执行机构，即 PID 控制器，电液转换器、继电器和油动机。

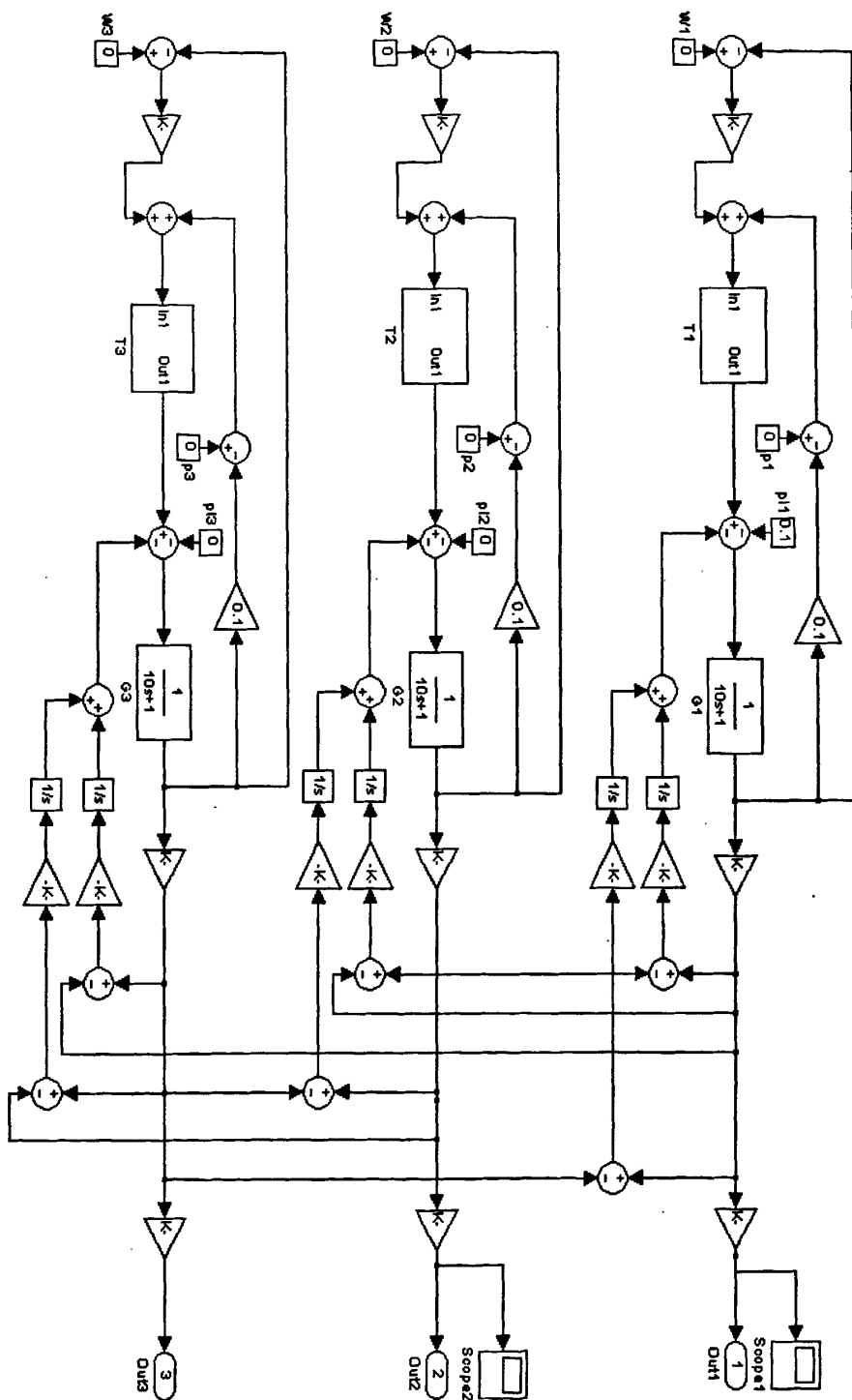


图 4-3 互联电力系统仿真图

因为实际电力系统中，在某一区域发生扰动或者故障时，两区域的母线相角的差 δ_{ij} 会有一定的变化，因此，受它的影响，传输线的同步系数 $T_{ij} = P_{\max ij} \cos \delta_{ij}$ 也会有一定的变化。在实际电力系统中，传输线的同步系数应该不是一个定值，而是根据电力系统的潮流情况变化的一个量，为了使仿真模型更加接近实际的互联系统，因此在建立模型的过程中要考虑到这一变化。联络线间的相角差可以用下式表示。

$$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j = (\delta_{i0} + \Delta\delta_i) - (\delta_{j0} - \Delta\delta_j) = (\delta_{i0} - \delta_{j0}) + (\Delta\delta_i - \Delta\delta_j)$$

即 δ_{ij} 可以表示成两区域初始相角差与两区域相角变化量差的和。在建立互联系统的模型过程中，传输线的同步系数 $T_{ij} = P_{\max ij} \cos \delta_{ij}$ 可以用下图所示的仿真环节来表示。其中 δ_i 和 δ_j 由潮流计算求得。

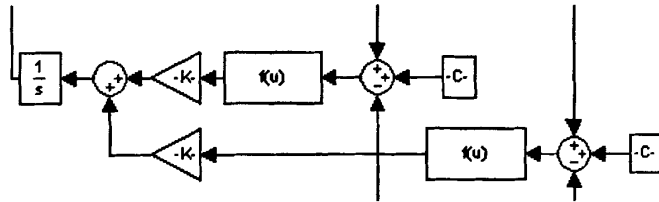


图 4-4 传输线同步系数仿真示意图

三区互联电力系统，假设在某一区域发生大小为 $\Delta P_e = 0.1$ 的扰动，互联电力系统的故障区域的传输线功率如图 4-4 所示。故障区域的频率随时间变化的响应如图 4-5 所示。在仿真过程中，由于假设三区域的参数完全相同，因此作为非故障区域的两个区域的频率随时间变化的曲线是相同的，如图 4-6 所示。相关参数选取如表 4-1 所示。

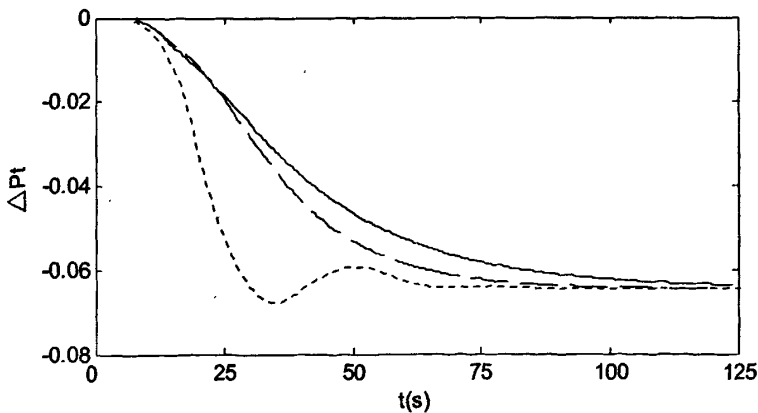


图 4-4 互联系统故障区域传输线功率

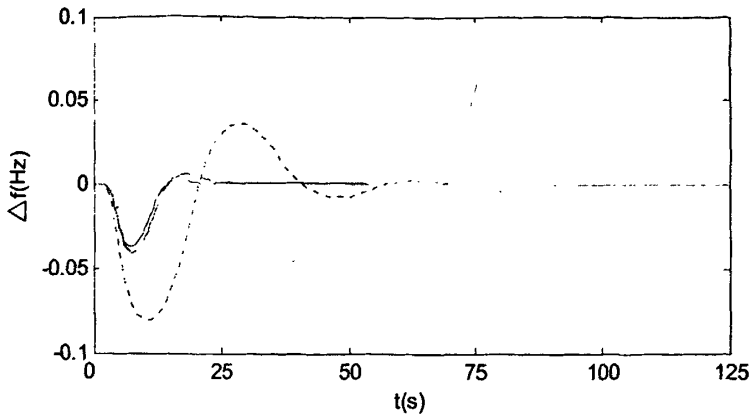


图 4-5 互联系统故障区域频率响应曲线

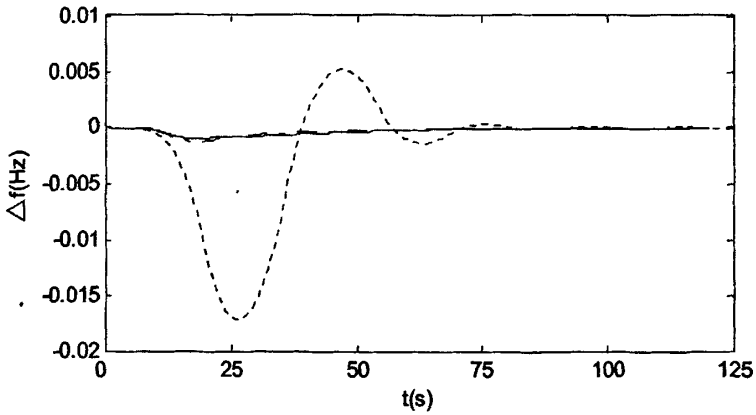


图 4-6 互联系统非故障区域频率响应曲线

表 4-1 互联系统仿真相关参数

算法	线型	优化参数
传统	点线	$K_p = 20, K_i = 2, K_d = 50$
粒子群	虚线	$K_p = 80.3026, K_i = 8.3881, K_d = 94.5463$
混沌粒子群	实线	$K_p = 97.5692, K_i = 6.9763, K_d = 99.7326$

传输线传输有功功率实现系统的功率平衡，在故障情况下，不同区域间进行有功补偿也是通过传输线进行的，传输线上的功率的大小直接关系到系统的稳定性。图 4-4 为互连网络单区域发生扰动时，故障区域的传输线上的功率曲线。由图可见，三种调节器对应传输功率的最大值是相等的，但是在从故障发生到稳定

的过程中,基于混沌粒子群算法的调节器的频率变化更迅速,且没有波动,想比较而言,更有利于系统的稳定。由图 4-5 和图 4-6 可以看出,不管是在故障区域还是在非故障区域,传统算法对应的频率响应曲线都产生了震荡,且对超调量的抑制和调节时间上明显劣于两种粒子群算法。而两种粒子群算法相比较,改进后的算法对应的频率响应曲线波动的振幅比较小,控制效果更优。同时和第三章中单机无穷大系统的仿真曲线相比较,可以看出,互连电力系统中发生扰动时,故障区域的频率只有传统算法产生了振荡,且最大振幅仅有 0.035Hz 左右,两种粒子群算法对应的频率超调很小,且很快稳定下来;而单机无穷大系统的仿真中,三种算法对应的频率都产生了振荡,振幅大的达到 0.07Hz 左右,小的也有 0.05Hz 左右。这可以得出,互联系统更有利于频率稳定,即和单机系统相比,互联系统有更好的安全性,为电能的质量提供了更加可靠的保证。比较图 4-5 和图 4-6,可见,故障区域的频率变化远大于非故障区域,非故障区域通过联络线向故障区域输送功率,以降低扰动对故障区域的影响,但是故障区域本身仍承担了大部分危害。

4.3 本章小结

本章研究了电力系统互联网络,以最基本的三区域系统为例建立了数学模型,并采用 MATLAB 的 Simulink 组件搭建仿真模型。通过仿真电力系统的故障,验证基于粒子群算法和混沌粒子群算法的同步发电机最优调速控制器的控制效果。仿真结果表明基于混沌粒子群算法在抑制震荡,减小超调等方面有更好的效果。同时仿真也证明了电力系统互连有利于加强系统的稳定,能够更好的保证电能质量。

第五章 结论

同步发电机的调速控制系统是非线性的、要求响应速度快的实时闭环反馈控制系统。本文从调速控制系统的实际要求出发,在针对各种控制理论研究和总结的基础上,结合我国现阶段同步发电机调速控制系统的硬件设施,在调速器的控制方式方面作了一定的研究的工作,取得了一定的成果。

本文分析了同步发电机调速控制系统在电力系统有功功率稳定中的重要作用,提出了针对我国目前广泛应用的数字式电液控制器的控制参数的优化的必要性。本文研究了电力系统中广泛应用的中间再热式汽轮机的主要组成部分,建立了完整的发电机的数学模型,为仿真研究打下了基础。

本文了解了粒子群算法的基本原理,在运算过程中整个粒子群都是根据全体粒子和自身的经验向着最优解的方向“飞行”,在较大的动量系数作用下,粒子有可能错过最优解,在远离最优解的空间中发散,使算法不能收敛;而且,在算法收敛情况下,由于所有的粒子都向着最优解的方向搜索,所以所有的粒子趋向同一,失去解的多样性,使得后期收敛速度明显变慢。

针对粒子群算法的不足,本文采用了混沌粒子群算法。混沌粒子群算法是采用混沌算法对粒子群进行改进的一种智能算法。由于混沌算法具有遍历性的特点,因而可作为搜索过程中避免陷入局部极小的一种优化机制。用混沌算法和粒子群算法相结合,以粒子群算法作为算法的主体,对种群中最好的粒子进行混沌搜索,指导粒子往最优解方向搜索,从而改善粒子群算法进化后期收敛速度慢,容易陷入局部极小解的缺点。本文将混沌粒子群用于同步发电机最优调速控制器设计,采用混沌粒子群算法对同步发电机调速器(本文中为PID控制器)的控制参数(K_p 、 K_I 、 K_D)进行优化,设计出基于混沌粒子群的同步发电机最优调速控制器。

对单机——无穷大系统系统进行仿真试验,考虑发电机机械扰动和出现短路故障的情况,对每种情况下传统的调速控制器、基本粒子群算法的调速控制器以及混沌粒子群算法调速控制器的频率曲线进行比较,证明了基于混沌粒子群算法的同步发电机调速控制器具有对工程经验依赖性小,简单实用等特点,对于发电机工况的偏离也有良好的适应性,调节效果明显优于传统的调速控制器和基于基本粒子群算法的调速控制器。

本文以简单的三区域互联系统为例建立了互联系统的数学模型,并对小扰动情况进行了仿真分析,仿真结果证明,在互联系统中,基于混沌粒子群算法的调

速控制器在抑制功率传输,保持电力系统稳定性方面稍有优势,而在抑制频率波动,保持电力系统的频率稳定方面基于混沌粒子群算法的调速控制器控制效果仍然大大优于另外两种控制器。

参考文献

- [1] 郭培源, 电力系统自动控制新技术, 北京: 科学出版社, 2001. 78~87
- [2] 杨冠城, 电力系统自动装置原理, 北京: 水利电力出版社, 1986. 127~167
- [3] 上海新华控制技术(集团)有限公司, 电站汽轮机数字式电液控制系统, 北京: 中国电力出版社, 2005. 24~68
- [4] Eberhart, R. and Kennedy, J. A new optimizer using particle swarm theory[C], Proc 6 International Symposium on Machine and Human Science, 1995, pp. 39-43. Ourari, M.L, Dessaint, L.A, Do, V.Q. Generating units aggregation for dynamic equivalent of large power systems. Power Engineering Society General Meeting, 2004, 2(1): 1535~1541
- [5] Kennedy, J. and Eberhart, R. Particle Swar, Optimization[C], IEEE International Conference on Networks (Perth , Australia), IEEE Service Center, Piscataway, NJ, 1995, IV: 1942~1948
- [6] 樊玮, 粒子群优化方法及其实现, 航空计算技术, 2004: 34 (3) 39~42
- [7] 王冬梅, 群体智能优化算法的研究: [硕士学位论文], 武汉; 武汉科技大学, 2004
- [8] 杨俊杰, 周建中, 吴玮, 刘芳, 改进粒子群优化算法在负荷经济分配中的应用, 2005, 29 (2): 1~4
- [9] Jong-Bae Park, Ki-Song Lee. Economic load dispatch for non-smooth cost functions using particle swarm optimization[C]. Ontario, Canada: IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2003: 938~943.
- [10] 赵波, 曹一家, 电力系统无功优化的多智能体粒子群优化算法, 中国电机工程学报. 2005, 25 (5): 1~7
- [11] 周晖, 周任军, 谈顺涛, 周皓, 用于无功综合控制的改进粒子群优化算法, 电网技术, 2004, 28 (13): 45~49
- [12] Sensarma P S, Rahmani M.A comprehensive method for optimal expansion planning using particle swarm optimization[C]. New York, USA: Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, 2002:1317~1322
- [13] 金义雄, 程浩忠, 严建勇等, 改进粒子群算法及其在输电网规划中的应用[J], 中国电机工程学报, 2005, 25 (4): 46~50
- [14] Zwe-Lee Gaing. Discrete particle swarm optimization algorithm for unit commitment[C]. Ontario, Canada: IEEE Power Engineering Society General

- Meeting, 2003: 418~424
- [15] Chin Aik Koay, Dipti Srinivasan. Particle swarm optimization-based approach for generator maintenance scheduling[A]. Proceedings of the IEEE Swarm Intelligence Symposium 2003[C]. Indiana, USA, 2003: 167~173
- [16] 薛定宇, 控制系统计算机辅助设计, 北京: 清华大学出版社, 1996. 253~264
- [17] 韦刚, 电力系统分析基础, 北京: 中国电力出版社, 2006. 116~133
- [18] 何仰赞, 温增银, 电力系统分析, 武汉: 华中科技大学出版社, 2003. 110~127
- [19] 降爱琴, 郝秀芳, 数字电液调节与旁路控制系统, 北京: 中国电力出版社, 2006. 1~18
- [20] 方红庆, 郝培宏, 吴恺, 水轮机调速器控制技术研究, 山西水利科技, 2004, 15(2): 53~55
- [21] 方红庆, 沈祖诒, 基于改进粒子群算法的水轮发电机组 PID 调速器参数优化, 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 120~124
- [22] 张艳霞, 姜惠兰, 电力系统保护与控制, 北京: 清华大学出版社, 2005. 199~225
- [23] 于达仁, 毛志伟, 徐基豫, 汽轮发电机组的一次调频动态特性, 中国电机工程学报, 1996, 16(4): 221~225
- [24] 于达仁, 郭钰锋, 一次调频的随机过程分析, 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 38~41
- [25] 林文孚, 胡燕, 单元机组自动控制技术, 北京: 中国电力出版社, 2004. 125~157
- [26] 代云修, 张灿勇, 汽轮机设备及系统, 北京: 中国电力出版社, 2006. 96~117
- [27] 张奎明, 时海刚, 热工自动化, 北京: 中国电力出版社, 2006. 345~381
- [28] 李建勇, 粒子群优化算法研究: [硕士学位论文], 浙江: 浙江大学, 2004
- [29] 郑泳凌, 计算智能在控制、优化和决策中的应用研究: [硕士学位论文], 浙江: 浙江大学, 2004
- [30] 商国才, 电力系统自动化, 天津大学出版社, 1999. 67~123
- [31] 何利铨, 邱国跃, 电力系统无功功率与有功功率控制, 重庆: 重庆大学出版社, 1995. 125~132
- [32] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖, 动态电力系统的理论和分析, 北京: 清华大学出版社, 2002. 186~191
- [33] 邹恩, 李祥飞, 张泰山, 混沌控制综述, 株洲工学院学报, 2002, 16(4): 16~18
- [34] 王东山, 贺国光, 交通混沌研究综述与展望, 土木工程学报, 2003, 36(1): 68~74
- [35] 王凌, 郑大钟, 李清生, 混沌优化方法的研究进展, 计算技术与自动化, 2001, 20(1): 1~5
- [36] 李兵, 蒋慰孙, 混沌优化方法及其应用, 控制理论与应用, 1997, 14(4): 613~615

- [37]杨俊杰, 周建中, 喻菁, 吴玮, 基于混沌搜索的粒子群优化算法, 计算机工程与应用, 2005, 16 (3): 69~71
- [38]苏宁, 贾欣乐, 混沌学及混沌控制概述, 系统工程, 1996, 14 (4): 7~12
- [39]张劲松, 李歧强, 王朝霞, 基于混沌搜索的混和粒子群优化算法, 山东大学学报, 2007, 37 (1): 1~5
- [40]王东风, 韩璞, 于朝辉, 电力系统中的混沌研究与混沌应用, 电力科学与工程, 2003, 12 (3): 74~78
- [41]Reynolds C, Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model. Computer Graphics. 1987. 21(4): 25~34
- [42]Li T Y, Yorke J A. Period three implies chaos. Amer Math Monthly, 1975, 82: 985~992
- [43]Ott E, Grebogi C. and Yorke J. A. Controlling chaos[J]. Physical Review Letters, 1990, 64(11): 1196~1199
- [44]Pecora L, Carroll T. Synchronization in chaotic systems[J]. Physical Review Letters, 1990, 64(8): 821~824
- [45]Aiharak, Takabe T. and Toyoda M. Chaotic neural networks[J]. Physics Letter A, 1990, 144(6/7): 333~340
- [46]Zhou, C, C. Hen. T. Chaotic annealing for optimization. Physical Review E. 1997, 55(3): 2580~2587
- [47]赵明旺, 求解非线性最小二乘全局解基于最速下降法和遗传算法的混合算法, 系统工程与电子技术, 1997, 21 (8): 59~63
- [48]欧志英, 严克明, 王柏岩, 共轭梯度法和最速下降法的混合算法, 甘肃工业大学学报, 1999, 25 (3): 89~91
- [49]徐敏, 林辉, 同步发电机迭代学习励磁控制器的仿真研究, 电网技术, 2005, 29(12): 81~84
- [50]盖志武等, 模糊-PID 励磁调节器, 电工技术, 2002, 2: 48~49
- [51]李南南, 吴清, 曹辉林, MATLAB7 简明教程, 北京: 清华大学出版社, 2006. 289~341
- [52]苏金明, 阮沈勇, MATLAB 实用教程, 北京: 电子工业出版社, 2005. 38~58
- [53]张志涌, 精通 MATLAB6. 5 版, 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003. 360~403

发表论文和科研情况说明

发表的论文:

- [1] 姜惠兰, 石欣, 张柳, “基于蚁群算法的发电机最优励磁控制系统”,
《2006年“中国高等学校电力系统年会”论文集》, 2006年10月
- [2] 姜惠兰, 张柳, 石欣, “基于时序结构神经网络的发电机模型辨识研究”,
《2006年“中国高等学校电力系统年会”论文集》, 2006年10月

致 谢

本论文的工作是在我的导师姜惠兰副教授的悉心指导下完成的,姜惠兰副教授严谨的治学态度和科学的工作方法给了我极大的帮助和影响。在此衷心感谢两年来姜老师对我的关心和指导。

在实验室工作及撰写论文期间,师兄、师姐和同窗好友对我论文中的研究工作给予了热情的帮助,在此向他们表达我的感激之情。

另外也感谢家人,他们的理解和支持使我能够在学校专心完成我的学业。