

Abstract

With the development of electric power system, the complexity of network structures and operation conditions have been increasing, which has brought new challenge to the security and stability of power systems. To design a robust and adaptive controller with the application of nonlinear control theory is very important to the stability of power system.

In this paper, the current power system stability control status is summed up. Fuzzy T-S models are constructed as an approximation to the nonlinear electric power system, based on which, robust H_∞ control and pole placement constraint theory is used to design the stability controller for power system. The designed results are more practical. Validity and high performance of the controller can be seen from simulations. At last, the conclusion contains discussions on some problems and directions for future study.

The following key elements:

(1) Introduce the power system stability control developments, the main power system control theory and research methods in the power system of the situation.

(2) The characteristics and structure of T-S fuzzy model are introduced respectively. Parallel distributed compensation and compensation and division for fuzzy Models are used to design the controller. The design methods for Takagi-Sugeno model based fuzzy systems with guaranteed H_∞ performance and additional constraint on the closed-loop pole locations are introduced. These objectives are formulated in terms of a convex optimization problem involving linear matrix inequality.

(3) Parallel distributed compensation is used to design H_∞ controller for a simple power system with periodic load perturbation. The control result is compared with compensation and division for fuzzy models.

(4) The T-S fuzzy model is constructed for power system including TCSC. Controller with guaranteed H_∞ performance and additional constraints on the closed-loop pole locations is presented. Performance of the controller is discussed by comparing of nonlinear H_∞ controller.

(5) Fuzzy excitation controller is designed for power system. To single machine infinite bus system, a dynamic feedback is used to replace the linear optimal excitation control. To multi-machine power system, a new full state feedback fuzzy controller is designed. Simulations are both obtained.

Key words: Power System, Nonlinear Systems, T-S Fuzzy Model, Parallel Distributed Compensation, Robust Control, Linear Matrix Inequality

声 明

本学位论文是我在导师的指导下取得的研究成果，尽我所知，在本学位论文中，除了加以标注和致谢的部分外，不包含其他人已经发表或公布过的研究成果，也不包含我为获得任何教育机构的学位或学历而使用过的材料。与我一同工作的同事对本学位论文做出的贡献均已在论文中作了明确的说明。

研究生签名： 张勇 2007 年 6 月 15 日

学位论文使用授权声明

南京理工大学有权保存本学位论文的电子和纸质文档，可以借阅或上网公布本学位论文的部分或全部内容，可以向有关部门或机构送交并授权其保存、借阅或上网公布本学位论文的部分或全部内容。对于保密论文，按保密的有关规定和程序处理。

研究生签名： 张勇 2007 年 6 月 15 日

1 绪论

1.1 选题的意义

随着经济、社会和人民生活对电力系统要求的不断提高,电力系统的规模不断扩大,单机容量进一步提高,电网结构也变得更加复杂。同时,由于受到生态环境和经济等因素的制约,电网区域间联络更加复杂,远距离大容量输电系统不断出现,系统运行更加接近于极限状态,这也使得电力系统的暂态稳定性问题日益严重。20 世纪 60 年代以来,国内外发生过许多因一处故障而波及全系统,导致全系统失去稳定的大停电事故,给国民经济和人民生活造成不可估量的损失^[1-3]。90 年代后,国外连续发生了几起因稳定性破坏而引起的大停电事故,国内南方电网和华北电网也发生过类似的大停电事故。如何提高电力系统稳定性,保证电力系统安全稳定运行,已经成为各国电力工业发展过程中亟待解决的关键问题。提高电力系统运行稳定性有许多方法,如改善输电网结构、汽轮机汽门快关技术、减小发电机和变压器电抗、采用高速励磁控制系统等^[6]。实践证明,对发电机组采用适当的控制方法拥有明显的优势,按效益投资比以及实现的难易程度来说励磁控制又是最好的方法,因此世界上许多国家将其列为基本措施。

目前提高电力系统稳定的方法和手段主要是采用电力系统的励磁控制和新型电力设备(如 FACTS)及其控制方式等。其中励磁控制则可以通过在原系统的基础上,只需改变系统的算法而不要追加其它元件便能够有效提高电力系统的稳定性,弥补传统励磁控制器的不足,这种控制方法既经济又有效。而改善电力系统稳定控制性能的最有效手段之一就是控制理论技术的提高和控制方法的改进^[1]。因此,伴随着控制理论与控制技术的发展,许多先进的控制理论和设计方法被相继应用于电力系统稳定控制中。从线性系统的最优控制理论到非线性系统的基本设计理论,从精确的非线性系统设计方法到考虑系统不确定性的鲁棒控制设计方法,各种先进控制理论的使用逐步提高了电力系统的暂态稳定水平。

将先进的控制理论应用于电力系统设计出鲁棒性能好、适应性强、易于工程实现的电力系统控制器,对电力系统的稳定有着重要的意义。

1.2 电力系统稳定

1.2.1 电力系统稳定的意义

电力系统正常运行的一个重要条件是具备足够的稳定裕度。电力系统的稳定主要包括功角稳定、电压稳定及频率稳定^[4-6]。国际上按照电力系统遭受干扰后的过渡过程的不同,一般将稳定分为暂态稳定、静态稳定和动态稳定。暂态稳定是指电力系统在稳定

状态下受到各种短路, 断路等大扰动, 扰动消失后, 最终能以一定的精度回到初始平衡点的性能; 静态稳定一般是指电力系统在运行过程中受到微小扰动后, 独立地恢复到原来的运行状态的性能, 也即小扰动稳定; 动态稳定是指在同步发电机采用负反馈自动励磁调节器后发生的一种自发振荡的情况下, 系统能够恢复到初始运行状态的性能, 与发电机的阻尼力矩有关^[2]。电力系统稳定可概述为系统正常运行条件下遭受扰动后能够恢复到可以容许的平衡状态^[6]。表征系统稳定与否的主要状态量是系统中主要机组之间和机组与无穷大系统之间的相对功角 $\Delta\delta_{ij}$ 以及相对角速度 $\Delta\omega_{ij}$, 若 $\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta\delta_{ij} = \beta$, 则系统是

稳定的(β 为包括 0 的有限常数, i 、 j 是系统中发电机组的编号, $i \neq j$)。电力系统一旦失去稳定, 其暂态过程非常快, 处理不当很可能殃及整个互联大系统, 往往造成大范围、长时间停电, 给国民经济和人民生活造成巨大影响, 在最严重的情况下, 甚至可能造成电力系统的崩溃和瓦解。

一直以来, 各国的专家、学者对电力系统的稳定性进行了大量的研究, 主要包括: 稳定性破坏发生的原因、过程和后果, 及其控制方法。在我国, 由于目前输电系统的建设远滞后于电源的建设, 高低压环网结构复杂, 且电网间存在强耦合, 从而更易发生暂态稳定性破坏事故, 而且从经济方面讲, 电网中某些输电线路的传输容量受到暂态稳定性要求的制约, 实际传输容量远低于线路的承载能力。在这些情况下, 研究和实现相应的暂态稳定控制措施, 不但可以提高系统运行的稳定性, 而且可以提高线路传输能力, 从而保证电力系统的经济可靠运行。

1.2.2 稳定性的分类

国际大电网会议(CIGRE)根据电力系统失稳的物理特征、受扰动的类型以及研究稳定问题必须考虑的电力设备特性、电压失稳的过程和失稳持续的时间等因素, 将电力系统稳定分为功角稳定、电压稳定和频率稳定三大类及众多的子类, 如图 1.1 所示。

(1) 功角稳定

功角稳定是指互联电力系统中的同步发电机受到扰动后保持同步运行的能力。当系统受到扰动后, 就可能使线路上的输送功率超过它的极限, 发电机与系统失去同步, 造成发电机与系统解列。功角失稳主要有两类^[6]: 一类是由于缺少有效阻尼转矩导致转子角增幅振荡, 另一类是由于缺少同步转矩导致发电机转子角度逐步增大。为便于分析和深入理解稳定性问题, 根据扰动的性质将功角稳定分为小扰动功角稳定和大扰动功角稳定。大扰动功角稳定也即暂态稳定, 是电力系统遭受输电线路短路、断路等大扰动时保持同步运行的能力, 它由系统的初始运行状态和受扰动的严重程度以及扰动的排除情况共同决定。在 IEEE 和 CIGRE 的定义与分类中, 小扰动功角稳定和大扰动功角稳定均被视为一种短期现象。

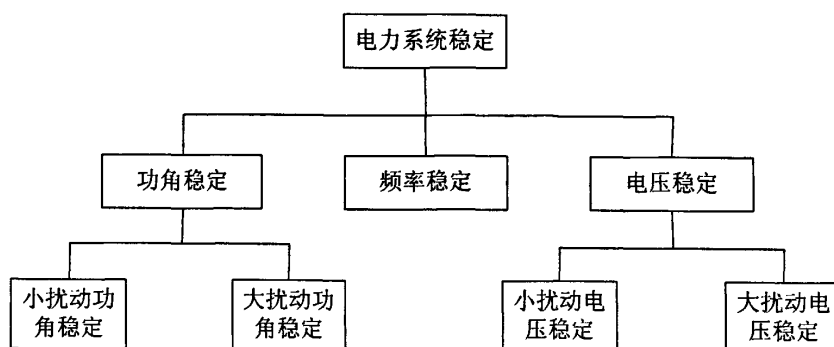


图 1.1 电力系统稳定的分类

(2) 电压稳定

电压稳定性已经研究了很多年，但学术界至今还没有给出严格的定义。加拿大学者 Kundur 在文献[6]中将电压稳定性定义为“电力系统在正常运行或经受扰动后维持所有节点电压为可接受值的能力”，电压失稳是指“扰动引起的连续且不可控制的电压下降过程”，至于电压崩溃是指“伴随着电压失稳的一系列时间导致系统的部分电压低到不可接受的过程”。Taylor 在文献[7]中定义电压失稳为：“电压稳定的丧失，导致电压逐步衰减的过程”，而电压崩溃定义是指“故障或扰动后的节点电压值已超出了可接受的范围”。

IEEE 和 CIGRE 稳定定义联合工作组于 2004 年给出了新的电压稳定的定义：“在给定的初始运行状态下，电力系统遭受扰动后系统中所有母线维持稳定电压的能力，它依赖于负荷需求与系统向负荷供电之间维持平衡的能力”。根据扰动的不同，电压稳定分为小扰动电压稳定和大扰动电压稳定两种。大扰动电压稳定是指电力系统遭受如系统故障、失去电源等大扰动后，系统所有母线保持稳定电压的能力。小扰动电压稳定是指电力系统遭受负荷变化等小扰动后，系统中所有母线维持电压在可接受范围内的能力。小扰动电压稳定既可能是短期的也可能是长期的。

(3) 频率稳定

电力系统的频率是电能质量的重要指标之一。电力系统正常运行时，系统的有功功率是平衡的，频率也处于稳定状态，如我国电网额定频率为 50 Hz。发电机出力和用电负荷的变化都会引起系统频率的偏移，因此有必要根据频率偏差进行实时调整。

系统频率、电压、功率相互制约。频率变化时，会引起发电机输出电磁功率变化，这是发电系统的频率特性或称之为发电频率调节效应；频率变化时，负荷消耗的功率也随之变化，这是负荷系统的频率特性或称之为负荷频率调节效应；频率的变化，还会引起电网电压的变化，而电压变化又会引起发电功率和负荷功率的变化。频率稳定是指电力系统受到严重扰动，发电和负荷需求出现大的不平衡后，系统仍能保持稳定频率的能力^[2]。频率稳定可以是一种短期或长期现象。

1.3 电力系统稳定控制的主要研究方法

现代电力系统具有多种运行方式和不确定的外界干扰,既有连续控制又有离散控制,分层和就地分散控制并存的非线性动态大系统。被测状态量和控制量在空间分布上可以相距上千公里,动态过程的时间分布可以由数十毫秒到数十分钟。用现代控制理论解决这样复杂动态大系统的安全稳定问题,需要面临一系列的问题。

1.3.1 电力系统数学描述

电力系统是一类典型的非线性大系统,可以由如下高维非线性微分-代数方程组来描述:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{m}) \\ 0 = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{m}) \end{cases}$$

其中, $\mathbf{x}$ 是系统的状态变量,如运动变量转子角 δ 和转子角速度 ω ,也可以是内电势 E'_d 、 E'_q ,控制元件的惯性环节等; $\mathbf{y}$ 是代数变量,如电流 I_d 、 I_q 。微分方程描述了系统中动态元件的动力学行为,代数方程反映系统各变量之间的耦合关系及网络拓扑约束。如果考虑控制器或某些电力系统元件的离散行为,还需要加入差分方程,所以电力系统是个混杂大系统,可以用一个非线性微分-差分-代数方程组来描述^[8-10]。

1.3.2 基于电力系统线性模型的研究

对于电力系统的线性模型,可以应用各种成熟的线性控制理论,如极点配置、线性最优控制、变结构方法、线性 H_∞ 控制、线性鲁棒控制等来设计控制器。这里的线性模型是通过对非线性模型在某一特定运行点处作泰勒展开并忽略高次项得到的,即进行局部线性近似化而得到的,这种模型依赖于系统特定的运行状态。

这种采用在某一点处近似线性化的模型作为设计依据的控制方式虽能够有效改善电力系统的静态稳定性,但对暂态稳定性没有明显改善。当电力系统遭受大干扰时,实际的运行点偏离设计控制器时所选的平衡点较大,产生较大幅度的振荡时,控制误差较大^[1]。只有采用其他线性化方法,寻找一个与平衡点无关的系统模型,根据此模型设计的控制器才能够较好适应运行状态的变化。

线性最优控制是现代控制理论中应用最多,最为成熟的分支。自上世纪 60 年代后期余耀南教授将线性最优控制应用到电力系统中以来^[3],我国学者在设计多参数全状态反馈最优励磁控制器方面展开了不少研究工作^[11,12]。文献[11]提出利用最优控制手段提高远距离输电线路输电能力和改善动态品质的问题,取得了一系列重要的研究成果。该研究指出了在大型机组方面应直接利用最优励磁控制方式替代古典励磁方式。目前最优励磁控制已进入了实用化阶段。在多机电力系统中,为了使不同地点的机组实现综合控

制相互配合,可采用最优分散协调控制。文献[12]提出的最优分散协调控制,是以全系统模型为基础设计各局部控制器,再对各局部控制器的控制结构加以分散约束。这使得各个控制器不仅对于它们的控制对象或局部系统的控制效果达到最优,能够协调一致地工作,同时还能保证全系统的性能在某种同一指标下达到最优。

目前,电力系统线性最优励磁控制器已经在电力生产中获得了应用,并发挥着重要的作用。

1.3.3 基于电力系统非线性模型的研究

电力系统正常运行及小干扰情况下可以不必考虑系统的非线性,用线性化模型及线性最优控制或其他成熟的线性控制理论设计控制器所产生的误差可以忽略不计。但在考虑大干扰作用时的暂态稳定控制时必需考虑非线性的影响。近年来,各种非线性控制理论被应用于电力系统,取得了很多研究成果。

1.3.3.1 反馈线性化法

(1) 基于微分几何理论的反馈线性化方法通过构造恰当的坐标变换,实现非线性系统的精确线性化,在所得到的线性模型的基础上运用线性控制理论设计控制器^[1]。微分几何方法适用于仿射非线性系统。对于仿射非线性单输入单输出系统,如果关系度 r 小于系统的维数 n 或者是没有明确输出的系统,可以假设一个虚拟输出,同样有可能实现系统的精确线性化;若系统的关系度 r 等于 n ,则一定可以构造出微分同胚映射,可以实现系统的精确线性化。文献[13]较早地将微分几何控制理论的新成果与电力系统基本理论相结合,提出了多机系统非线性解耦励磁控制方式的设计方法,得到了解析非线性励磁控制规律,突破了在特定平衡点线性化的传统设计模式,有效改善了多机电力系统的暂态稳定。文献[1]成功应用微分几何理论设计了励磁、汽门、以及 FACTS 的控制器,并且都取得了较好的控制效果。

基于微分几何理论的反馈线性化方法具有成熟的理论基础,但其控制律的推导要求较高的数学理论基础,同时非线性反馈的引入令控制器结构复杂,限制了其在工程中的运用。

(2) 直接反馈线性化方法(DFL)。对于一个非线性系统,通过引入恰当的非线性反馈来抵消原系统的非线性,能实现闭环系统的“伪”线性化,在此基础上只需采用常规的线性控制方法设计系统的控制器。DFL 方法的优点在于不需要进行复杂的坐标变换和大量复杂的数学推导,物理概念清晰,且便于工程应用。文献[14]在 DFL 的基础上,应用变结构控制理论设计了电力系统综合控制器,仿真表明该控制器不仅提高了系统的暂态稳定性且改善了故障后的电压的调节能力。

(3) 逆系统方法利用对象的逆构成一种可用反馈方法实现的 α -阶积分逆系统,将之串联在被控过程的前面,这样可以把对象补偿成为具有线性传递关系的系统,然后再对

该对象采用传统的线性控制方法进行控制^[15]。文献[16]将多变量的逆系统方法用于大型汽轮发电机组的综合协调控制,仿真结果表明所设计的控制器能有效地提高发电机的稳定性和电压精度。

在特定条件下,DFL、逆系统方法和微分几何方法本质上是等价的,可解性依赖于具体问题,对于多输入多输出(MIMO)系统很难保证系统的鲁棒性,并且需要系统的精确模型,难于工程实现。

反馈线性化方法的缺点是要求精确系统的模型和参数,因而不具备对参数和模型不确定的鲁棒性。电力系统在实际运行当中,存在着各种不确定性因素,比如稳定运行时负荷的波动、故障引起的系统拓扑结构的改变等。同时,在系统模型中也存在不确定性,如只能采用简化的模型,模型参数的不确定性等。因此,反馈线性化与鲁棒控制、变结构控制、自适应控制的结合是值得关注的。

1.3.3.2 Lyapunov 直接法

Lyapunov 直接法原来用于分析电力系统的稳定性及稳定域计算等,同时也是非线性控制设计的一个有力依据。对于一般的非线性控制系统,假设系统的平衡点是原点,直接法镇定设计就是寻找一个正定的 Lyapunov 函数 $V(x) > 0$ 对于 $\forall x \neq 0$ 成立,且 $V(0) = 0$, 并求得反馈控制规律 $u = u(x)$ 使得 $\dot{V}(x) < 0$, 根据 Lyapunov 稳定理论,这样可使闭环系统渐近稳定。显然, $\dot{V}$ 越负表明在动态过程中轨迹趋向于平衡点越快,因此控制规律须使 $\dot{V}$ 在所有时刻均取最负的值,这就是 Lyapunov 最优控制的设计思想。

Lyapunov 直接法由于直接考虑了系统的非线性特性,且物理概念清晰,在电力系统暂态稳定的分析及控制器的设计中得到了广泛的应用。采用 Lyapunov 直接法设计控制律的关键是选取适当的函数 V , 对于稳定的系统必然存在多种 Lyapunov 函数,如何选取合适的 Lyapunov 函数是比较困难的;同时高阶多维电力系统的 Lyapunov 函数相当复杂。文献[17]基于 Lyapunov 直接控制方法研究了非线性最优励磁控制器,数值仿真和基于微机实现的控制装置均说明了所设计控制器的优越性。文献[18]应用 Lyapunov 直接控制方法设计了鲁棒汽门控制器和励磁控制器并与传统控制策略进行了比较,结果表明在暂态稳定、临界清除时间和阻尼振荡方面均有更好的性能。

1.3.3.3 广义哈密顿 Hamilton 系统控制理论

广义哈密顿(Hamilton)系统理论是当前非线性科学的一个重要的研究方向。该系统理论突破了维数对经典哈密顿系统的限制,是一个开放的能量系统,即有与外界能量的交换,又有内部能量的耗散,适用于耗散系统理论中无源化控制设计方法。文献[19]基于 Hamilton 系统理论,提出了一种新的非线性稳定控制器的设计方法,并应用此方法设计了单机无穷大系统的发电机汽门与励磁协调控制器,获得了较为满意的结果。文献[20]将一类含有不确定项的非线性系统转化为 Hamilton 系统,研究了鲁棒 H_∞ 问题,并将其应用于多机系统励磁控制器的设计,取得了一定的成果。

从无源系统的角度看,构造 Lyapunov 函数的过程正是使系统无源化的过程,而无源性是指系统有外界输入时能量的衰减特性。无源化方法的引入为 Lyapunov 函数的构造提供了实际的物理意义。广义 Hamilton 系统的引入,有可能为非线性鲁棒控制的发展带来新的契机。因此,基于无源性和耗散性方法的鲁棒控制理论已成为电力系统鲁棒控制研究领域的热点之一。

1.3.3.4 非线性鲁棒控制

在实际电力系统中,被控对象总是存在着各种各样的不确定性,我们设计控制器所依赖的数学模型只是被控对象的近似描述。因此,鲁棒控制对非线性系统理论来讲是一个重要的课题。基于反馈线性化的非线性系统控制理论的出现,促进了非线性系统鲁棒控制理论的发展,它与 Lyapunov 稳定性理论、小增益理论以及耗散性或无源性等理论相结合,给出了许多有效的鲁棒系统分析和设计方法。目前,非线性鲁棒控制理论应用于电力系统控制主要有以下两种基本方法^[28]:第一种方法是通过反馈线性化对等效的线性系统应用线性鲁棒控制理论加以分析设计,以提高原非线性系统的鲁棒性。理论上讲,满足一定条件的非线性系统的扰动通过状态变换后可以变换成线性系统的扰动;第二种方法是通过某种变换将原非线性系统转换成一个新的等效标准型非线性系统,而这个新的非线性系统可以表述为带非线性扰动项的线性系统,在此基础上应用各种鲁棒控制方法进行设计。

非线性 H_∞ 控制是 20 世纪 80 年代提出的一种鲁棒控制理论,目前已有较多将该方法应用于电力系统的研究^[53,56]。非线性 H_∞ 设计的目标是尽量减少输入信号的最大增益,从而将不确定干扰对系统输出的影响限制在可接受的范围以内。非线性系统的 H_∞ 控制有两种思路:一种是对系统进行线性化,在此基础上估计出非线性项的上界,将它们作为不确定项处理,采用线性 H_∞ 方法进行设计;另外一种思路则将减少闭环系统的 L_2 增益作为设计目标,来获得满足条件的控制律。

但是,迄今为止,非线性鲁棒控制理论在电力系统的研究还不够完善。其中一个有待解决的问题就是不确定的建模,也就是说如何将不确定干扰项引入控制系统。目前,常用的不确定系统模型中的干扰项大多缺少明确的物理意义,不能准确地描述电力系统干扰的特性,以此为依据设计的鲁棒控制器,存在一定的局限性^[28]。

1.3.3.5 Backstepping 控制

上世纪 90 年代以来,随着 Backstepping 等递归设计方法的提出,这种新的构造性控制设计方法的研究引起了众多学者的关注。Backstepping 方法又称为反步法或逆推法,是一种通过设计反馈控制来构造 Lyapunov 函数的递归设计方法。一般的设计步骤为^[21]:首先选取系统的部分状态构成子系统,把其余状态当作是该子系统的虚拟输入,构造子系统的 Lyapunov 函数,设计虚拟控制律,使子系统稳定。基于设计出的虚拟控制,再选取系统的部分状态和前面的子系统组成新的子系统,构造新子系统的 Lyapunov 函数,

设计虚拟控制,使新的子系统稳定。按照此方法递归设计最后得到整个系统的实际控制律,使系统稳定。

Backstepping 方法直接在非线性系统的基础上设计控制器,不需要采取任何线性化方法。对于参数不确定性的系统,文献[22]将 **Backstepping** 方法与自适应机制有机结合设计了汽轮发电机的综合控制器,所设计的控制器对发电机参数的变化具有较强的鲁棒性,并能显著提高系统的稳定性,保证系统的电压精度。利用 **Backstepping**,还能实现对非线性时滞系统的镇定^[23]。

Backstepping 控制方法其设计过程简明且能有效处理参数不确定性及外界干扰,该方法具有很好的应用前景。

1.3.3.6 变结构控制

变结构控制是滑动模态变结构控制的简称,这种控制设计方法是将控制器分解为若干个不同的子控制器组成,这些子控制器的参数和结构都有所不同,系统在工作过程中根据某种规则在这些子控制器之间切换以达到改善系统动态性能的目的。在控制过程中,系统处在一种不连续的跳变状态,因此即使原系统是线性的,这种控制系统也不是线性的^[21]。

构造变结构控制器的核心是滑动模态的设计,即切换函数的选择算法。对于线性系统来说,滑动模态的设计已有较完善的结果。对于非线性系统则只能具体问题具体分析。变结构控制有许多优点,易于实现,对于参数的变化具有较强的鲁棒性。但变结构控制也存在一些不足,主要是会产生抖动。

变结构控制一般定义如下,考虑非线性系统

$$\dot{x} = f(x, u, t), x \in R^n, u \in R^m$$

控制量 $u = u(t, x)$ 按下列逻辑在切换流形上进行切换^[21]

$$u_i(t, x) = \begin{cases} u_i^+(t, x), s_i(t, x) > 0 \\ u_i^-(t, x), s_i(t, x) < 0 \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m$$

上述系统与通常的连续反馈控制系统不同,控制量按一定的逻辑进行切换,即系统的结构按一定的规律变化。文献[24]运用非线性系统的变结构控制理论,结合励磁控制的特点设计了单机无穷大系统的变结构励磁控制器。文献[25]针对多机系统以线性化后的状态变量构造了滑动面,设计的变结构励磁控制器能够有效提高系统的稳定性能。

1.3.3.7 自适应控制

自适应控制的研究对象是具有一定程度不确定性的系统,自适应控制器能够随对象或扰动的动态变化自动修正自身的特性,目前成熟的自适应控制系统包括两类。模型参考自适应控制,以模型和对象的输出误差作为反馈信号,通过动态调整控制器的参数使

得输出误差收敛到零；参数自适应控制，参数自校正调节器根据对象的输入/输出特性在线的对对象参数进行递推估计，然后根据递推得到模型实时调整控制律。

电力系统自适应控制应用研究始于 20 世纪 80 年代初，由于自适应控制方法所具有的特点，多年来电力系统自适应控制应用研究一直受到科技工作者的关注，并取得了一批有意义的成果^[21,26]。采用自适应控制技术能够有效地解决模型不精确和模型变化所带来的鲁棒性问题，但是由于它需要复杂的在线计算和递推估计，只是适合于一些实时性不高的过程^[27]。

1.3.3.8 智能控制

智能控制技术包括：人工神经网络、模糊控制和专家系统控制等。因其具有一定的“智能”特性，在电力系统中得到了广泛的关注，获得了大量的研究成果。如引入专家的经验知识，能够处理不确定性问题、具有自学习的能力、擅于处理非线性问题等优点，成为电力系统研究中一个重要的研究领域。智能技术既可以作为一种上层策略以实现在线或离线调整，优化原有非智能控制器的参数或结构，也可以作为一种底层控制规律来取代原有励磁控制的某一环节，实现特定的控制算法或映射关系。综合智能控制将智能控制与现代控制方法相结合，把各自优势相结合，综合智能控制系统将会对电力系统起到更加重要的作用^[28]。

如何将各种非线性控制的优点结合在一起设计一种高效实用的电力系统稳定控制器，仍是目前研究的热点。

1.4 广域测量系统对电力系统稳定控制的影响

由于现代电力系统的结构更复杂、控制手段更灵活、协调更困难，为了改变传统的电力系统测量、分析和控制方法，电力系统必须与计算机、通信、网络、全球卫星定位系统(GPS)等交叉和融合，形成和发展基于实时同步数据采集和处理的广域相量测量系统(WAMS, Wide Area Measurement System)^[29]。这种以基于动态相量测量单元(DPMU, Dynamic PMU)的广域测量系统实现了广域电网在线安全性分析、监测与控制，已经成为世界各国电网建设的一个重大安全战略措施。

对于多机电力系统的暂态和动态稳定控制，之前一直强调控制分散和局部化，因为在当时的条件下无法获得全局信息。但 WAMS 技术的应用有助于在同一时间参考轴下获得大规模电力系统中大量的实时动态和稳态信息，应用 PMU 能够获得发电机功角和母线电压相量的实时数据，为电力系统的广域稳定控制提供了必要的信息。不可否认，在 WAMS 中，由于变换器延迟、相量处理时间、PMU 输出数据尺寸、多路传输和变换、相关的通信链路、数据集中器等环节不可避免地造成通信“延时”，这将直接影响控制系统即时有效地工作，甚至破坏控制系统的有效性，延长了为提高电网稳定性和防止系统振荡的控制装置的动作时间，干扰了系统的稳定性^[30]。因此，PMU 的配置与通信“延

时”势必影响广域稳定控制系统的可用性、有效性，如何解决这类问题也是电力系统当前的研究热点。

目前，WAMS 已经在我国的江苏电网、湖南电网、南方电网以及东北电网得到了应用^[30,31]，但是关于它们的时滞特性的研究还很不够充分。开展我国广域测量系统和信息网络的时滞特性的定量研究，包括数值仿真研究和实际测量研究是一项基础性的工作，对于 WAMS 的优化设计具有重要的指导意义，对基于 WAMS 的电力系统广域控制设计具有重要的影响，值得深入研究。

1.5 小结

从目前电力系统的发展趋势来看，如何采取有效的控制方法和稳定措施以保证互联大电网的全局稳定性仍是当前电力系统稳定分析与控制研究的紧迫任务。

从控制方法来看，非线性控制理论在电力系统中成功的应用明显地提高了电力系统暂态稳定性，对增强电压稳定性也有显著的作用。然而由于非线性控制器的复杂性，使其难以应用于工程实践。线性控制简单易于实现，却又无法达到满意的控制效果。

如何设计出一种能够有效改善系统稳定性能，且构成简单、易于工程实现的电力系统稳定控制器，是科技工作者所要面临的一个重要课题。

1.6 本文的主要工作

现代电力系统的规模和复杂程度正在显著增大。社会经济的发展促使现代输电网的管理和运营模式发生变革，对其安全、稳定、高效、灵活运行控制的要求日益提高，从而急需发展新的调控手段，提高其稳定性和可靠性。随着以大机组、超高压电网为特点的大规模电力系统的迅速发展，改善系统运行的安全稳定性能成为日趋重要和紧迫的研究课题。在这种情况下，为保证系统安全、稳定和经济运行，有效的方式是采取适当的控制手段。

本文利用 T-S 模糊模型无穷逼近非线性系统的特性，针对电力系统的非线性模型，构造了电力系统的 T-S 模糊模型。在此基础上，研究了电力系统稳定控制问题。针对某个给定电力系统，求取满足某种性能的控制规律，以提高系统的稳定性，改善系统的鲁棒性能。

其主要工作如下：

第一章介绍了电力系统稳定的意义及分类，简述了电力系统稳定控制的发展概况、电力系统稳定控制的主要研究方法以及现代控制理论在电力系统稳定控制中的应用情况。

第二章介绍了 T-S 模糊模型的特性及构成，模糊控制理论的发展概况。简述了模糊动态系统控制器设计的系统化方法，包括系统的稳定性，模糊模型相除技术，并行分配

补偿技术。设计控制器时,考虑系统的稳定性,极点区域约束要求以及鲁棒 H_∞ 性能。T-S 模型系统能够无限逼近非线性系统,且控制器构成简单,具有很好的实用价值。

第三章针对一类含周期性负荷扰动的简单电力系统,构造了系统的模糊 T-S 模型。基于并行分配补偿技术(PDC)设计了模糊 H_∞ 控制,并与基于模糊模型相除技术(CDF)的控制器进行比较。

第四章针对一类含 TCSC 的等效两机电力系统,设计了满足稳定性、极点配置、鲁棒 H_∞ 的多目标模糊控制器。并与基于反馈线性化的 H_∞ 控制器的控制效果进行比较。

第五章将 T-S 模糊模型应用于电力系统励磁控制器设计。改进了传统的最优励磁控制单点线性化误差大的缺点,采用多点线性化,利用模糊隶属度函数将固定反馈改进为动态非线性反馈。随着广域测量系统(WAMS)被引入电力系统,使得电力系统全状态量的获得成为可能,基于此设计了多机系统全状态多目标反馈控制器。

第六章总结了本文的工作。分析了本论文中电力系统模糊控制器的特点。同时,根据电力系统稳定控制的要求及本人在论文完成过程中所遇到的一些问题,提出一些未来亟待解决的问题,并对未来工作进行了展望。

2 非线性系统基于 T-S 模糊模型的鲁棒控制

2.1 引言

模糊控制(Fuzzy Control)是近代控制理论中一种基于模糊数学理论,采用语言规则与模糊推理系统来实现的高级控制策略,是人工智能控制的重要分支,也是目前的一个研究热点。近年来,模糊控制发展迅速,得到了广泛的应用,非常引人注目。模糊控制不仅适用于常规的非线性单变量系统,而且逐渐向大规模、复杂非线性系统扩展。它具有明显的优点:易于熟悉、可靠性高、实用性强,能获得专家知识和熟练操作经验的良好自动化效果等。

1965 年,美国加州大学 L.A.Zadeh 博士发表了 Fuzzy Set 论文创立了模糊集合论,为解决复杂系统的控制问题提供了强有力的数学工具。1974 年,英国学者 E.H.Mamdani 教授首次将模糊集和模糊语言逻辑用于控制蒸汽发动机的压力和速度,结果获得了比常规 PID 控制更好的控制性能。随后丹麦的 F.L.Smith 公司成功将模糊控制应用到水泥窑的控制中,为模糊控制理论的实际应用开辟了崭新的前景^[32]。由于模糊控制技术具有控制器设计简便、适用于许多非线性系统且鲁棒性强等特点,20 世纪 80 年代以来,在理论和工程实践方面都获得了较大的进步与发展。模糊控制器与常规控制器区别在于,无需采用微分方程、传递函数或状态方程等精确的数学描述,而是通过定义模糊量、模糊集合以及相应的隶属度函数,采用一组模糊条件语句来描述输入与输出之间的映射关系。这种用模糊条件句来表示输入输出关系的模型称为模糊模型,是一种语言模型^[32,33]。

模糊控制本质上是是非线性的,缺乏像常规控制系统中使用的稳定性分析工具,而模糊控制器设计又包含了许多人为因素,因而对其进行稳定性分析显得尤为重要。日本学者 Takagi 和 Sugeno 于 1985 年提出了著名的 T-S 模糊系统^[34],为模糊系统稳定性分析提供了系统化的理论框架。特别是基于 LMI 理论的 T-S 模糊控制系统的稳定分析与控制器设计理论的提出^[35],是近年来模糊控制领域内的重大进展之一,它使得这类多变量模糊控制器的设计有了严格的理论依据。

模糊控制是以模糊集合论、模糊语言变量及模糊逻辑推理为基础的一种计算机数学控制。它是一种非线性控制方法,从属于智能控制范畴而且已成为目前实现智能控制的一种重要而有效的形式,具有巨大的应用潜力。模糊控制的核心是用语言描述的控制规则。语言控制规则通常用“如果…,则…(If…, Then…)”的方式来表达在实际控制中的专家知识和经验。If 部分,又称条件部分,属于模糊推理的前件,是由被控制量等构成的命题;Then 部分,又称为结论部分,是描述控制量的命题。模糊控制的最大特征是将专家控制经验、知识表示成语言控制规则,然后用这些规则去控制系统。因此,模糊控制特别适用于模拟专家对数学模型未知的、复杂的非线性系统进行控制。

2.2 非线性系统 T-S 模糊建模

2.2.1 T-S 模糊模型的构成

T-S 模糊建模能够用一些模糊词汇对系统的性能进行语言描述，操作人员能根据该过程的语言描述及专家信息制定出一系列成功的控制规则。

非线性系统的状态方程写成如下形式：

$$\dot{x} = F(x, u) = f(x) + g(x)u \quad (2.1)$$

则其模糊状态方程模型可表示为

$$R_p^i: \text{If } x_1(t) \text{ is } M_1^i \text{ and } \cdots \text{ and if } x_n(t) \text{ is } M_n^i$$

$$\text{Then } \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t), \quad i=1, 2, \cdots, l$$

则可得到整个系统状态方程为

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^l h_i(x) [A_i x(t) + B_i u(t)] \quad (2.2)$$

其中， $h_i(x) = \mu^i(x) / \sum_{j=1}^l \mu^j(x)$ ， $\mu^i(x) = \prod_{j=1}^n \mu_j^i(x)$ ， $\mu^i(x)$ 表示 x 属于 M^i 的隶属度

函数，同时也表示第 i 条规则的适用度。由此可见 T-S 模糊推理的输出是线性的或是常数。省掉了模糊化和反模糊化，便于数学分析。

2.2.2 T-S 模型的求取

求在平衡点 (x_0, u_0) 附近，即满足

$$F(x_0, u_0) = 0$$

的线性模型可用 Taylor 级数展开法，并忽略高次项得

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u$$

其中 $\Delta x = x - x_0$ ， $\Delta u = u - u_0$ ， $A = \left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_{\substack{x=x_0 \\ u=u_0}}$ ， $B = \left. \frac{\partial F}{\partial u} \right|_{\substack{x=x_0 \\ u=u_0}}$ 。

2.2.3 确定隶属度函数

模糊理论已日益成熟，利用模糊控制理论设计控制系统时不需要建立被控对象精确的数学模型，这样便能够有效提高建模的精度，也因此得到了广泛的应用。模糊语言变量的定量描述由它的隶属函数确定，正确地确定隶属函数，是运用模糊集合理论解决实际问题的基础。

目前,隶属度函数的确立还没有一套成熟有效的方法,大多数还停留在经验和实验的基础上。对于同一个模糊概念,不同的人会建立不完全相同的隶属度函数,尽管形式不完全相同,只要能反映同一模糊概念,在解决和处理实际模糊信息的问题中仍能殊途同归^[37]。

常用的隶属度函数有^[37,38]:

(1) 正态型

正态型是最主要也是最常见的一种分布,表示为

$$\mu(x) = e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^2}$$

(2) 三角隶属度函数

三角隶属函数是使用最为广泛的隶属度之一。如图 2.1(a)所示可表示为

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ \frac{x-c}{b-c}, & b < x < c \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

(3) Z 形隶属度函数

Z 形隶属度函数有两个参数 a, b , 分别为隶属度函数曲线中斜线部分极点的位置。如图 2.1(b)所示。

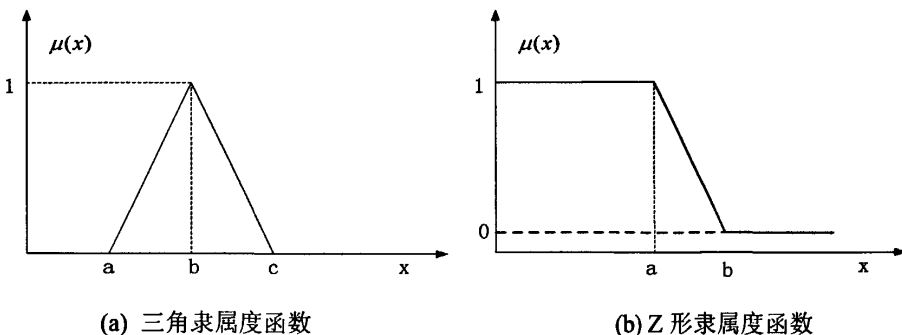


图 2.1 隶属度函数

2.3 动态系统基于并行分配补偿(PDC)设计方法

2.3.1 并行分配补偿设计思想

T-S 模型的结论即模糊后件是采用线性方程式描述的,便于采用传统的线性控制策略设计相关的控制器。Tanaka 等人采用并行分配补偿法(Parallel Distributed Compensation, PDC)设计控制器^[39],即对每个线性子系统设计一个局部的线性状态反

馈控制器，可以采用极点配置设计方法或线性二次型最优控制器的设计方法等。PDC 控制器设计如下

$$R_p^i: \text{ if } x_1(t) \text{ is } M_1^i \text{ and } \cdots \text{ and if } x_n(t) \text{ is } M_n^i$$

$$\text{then } u(t) = -K_i x(t)$$

根据 PDC 思路，整个系统的控制规律为各个子系统局部反馈控制的加权和，即

$$u(t) = -\sum_i^l h_i(x) K_i x(t) \quad (2.3)$$

$$\text{其中, } h_i(x) = \mu^i(x) / \sum_{j=1}^l \mu^j(x)。$$

由此可以看出整个系统的控制实质是一个非线性的时变状态反馈。以上控制器是根据局部的线性子系统来加以设计的，而整个系统是否稳定需要重新验证。

引理 1^[33]: 对于非线性系统 $\dot{x} = f(x(t))$ ，式中， $x(t) \in R^n$ ； $f(0) = 0$ 。假设存在一个标量函数 $V(x(t))$ 满足以下条件：

- (1) $V(0) = 0$ ；
- (2) $\forall x(t) \neq 0, V(x(t)) > 0$ ；
- (3) 当 $\|x(t)\| \rightarrow \infty, V(x(t)) \rightarrow \infty$ ；
- (4) $\forall x(t) \neq 0, \frac{dV(x(t))}{dt} < 0$ ，

则非线性系统关于平衡点 $x(t) = 0$ 是全局渐近稳定的。

定理 1^[32,33]: 如果存在正定对称矩阵 P ，使得线性矩阵不等式 $(G_{ij} = A_i - B_i K_j)$

$$\begin{aligned} G_{ii}^T P + P G_{ii} &< 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \\ \left(\frac{G_{ij} + G_{ji}}{2} \right)^T P + P \left(\frac{G_{ij} + G_{ji}}{2} \right) &< 0, \quad i < j \leq N \end{aligned} \quad (2.4)$$

成立，则闭环系统是渐近稳定的。

定理 1 的详细证明过程参见文献[32,33]，取

$V(x(t)) = x^T(t) P x(t)$ 求 $V(x(t))$ 对时间的导数

$$\dot{V}(x(t)) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \mu_i(z(t)) \mu_j(z(t)) x^T(t) \times \left[(A_i - B_i K_j)^T P + P (A_i - B_i K_j) \right] x(t)$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{i=1}^N \mu_i^2(z(t)) \mathbf{x}^T(t) \times \left[\mathbf{G}_{ii}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{G}_{ii} \right] \mathbf{x}(t) \\
&\quad + \sum_{i < j}^N 2\mu_i(z(t))\mu_j(z(t)) \mathbf{x}^T(t) \times \left[\left(\frac{\mathbf{G}_{ij} + \mathbf{G}_{ji}}{2} \right)^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \left(\frac{\mathbf{G}_{ij} + \mathbf{G}_{ji}}{2} \right) \right] \mathbf{x}(t)
\end{aligned}$$

如果式(2.4)成立, 则当 $\mathbf{x}(t) \neq 0$ 时, 得 $\dot{V}(\mathbf{x}(t)) < 0$, 所以由引理 1 可知模糊系统是渐近稳定的。

2.3.2 基于并行分配补偿法的鲁棒控制

2.3.2.1 基于并行分配补偿法的 H_∞ 控制

给出如下含扰动的非线性系统的和状态空间描述

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \boldsymbol{\omega}(t))$$

则, 可用如下 T-S 模型描述

$$\begin{aligned}
&R_p^i: \text{ if } x_1(t) \text{ is } M_1^i \text{ and } \cdots \text{ and if } x_n(t) \text{ is } M_n^i \\
&\text{ then } \begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}(t) + \mathbf{H} \boldsymbol{\omega}(t) \\ \mathbf{z}(t) = \mathbf{C} \mathbf{x}(t) + \mathbf{D} \mathbf{u}(t) \end{cases} \quad (2.5)
\end{aligned}$$

采用并行分配补偿法(PDC)确定 T-S 模糊模型的模糊控制器结构, 模糊控制器的设计享用模糊模型的前件。控制器的结构如下

$$\begin{aligned}
&R_p^i: \text{ if } x_1(t) \text{ is } M_1^i \text{ and } \cdots \text{ and if } x_n(t) \text{ is } M_n^i \\
&\text{ then } \mathbf{u}(t) = \mathbf{K}_i \mathbf{x}(t), \quad i=1, 2, \dots, l
\end{aligned}$$

R_p^i 表示控制器的第 i 条规则, 整个系统的控制规律为各个子系统局部反馈控制的加权和, 即

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{K}(h) \mathbf{x}(t) = \sum_{i=1}^l h_i \mathbf{K}_i \mathbf{x}(t)$$

代入式(2.5)得到闭环系统

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(h) \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(h) \mathbf{K}(h) \mathbf{x}(t) + \mathbf{H} \boldsymbol{\omega}(t) \\ \mathbf{z}(t) = \mathbf{C} \mathbf{x}(t) + \mathbf{D} \mathbf{K}(h) \mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (2.6)$$

引理 2: 对于式(2.6)和给定的正数 $\gamma > 0$, 存在状态反馈阵 $\mathbf{K}(h)$, 使性能指标

$\|\mathbf{G}_{zw}(s)\|_\infty < \gamma$ 成立的充分必要条件是存在正定对称矩阵 $\mathbf{P}$, 使下式成立

$$\begin{bmatrix} A^T P + PA + PBK + K^T B^T P & (C + DK(h))^T & PH \\ C + DK(h) & -I & 0 \\ H^T P & 0 & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0.$$

用 $\text{diag}[P^{-1} \quad I \quad I]$ 分别左乘, 右乘引理 2, 并令 $Q = P^{-1}$, $Y(h) = K(h)Q$ 即得

定理 2^[32,40]: 存在正定对称矩阵 P 和控制律, 使引理 2 成立的充分必要条件是, 存在正定矩阵 Q 和 $Y(h)$ 使得

$$\begin{bmatrix} QA^T(h) + A(h)Q + B(h)Y(h) + Y^T(h)B^T(h) & (CQ + DY(h))^T & H \\ CQ + DY(h) & -I & 0 \\ H^T & 0 & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0$$

其中 $Q = P^{-1}$, $Y(h) = K(h)Q$, $Y_i = K_i Q$, 所以 $K_i = Y_i Q^{-1}$ 。

对于式(2.5)和给定的正数 $\gamma > 0$, 存在状态反馈控制律 $u = Kx = YQ^{-1}x$, 使性能指标 $\|T_{zw}(s)\|_{\infty} < \gamma$ 成立的充分必要条件是存在正定对称矩阵 Q 和 Y_i , 使得下列不等式成立

$$\begin{aligned} \Psi_{ii} &< 0, i=1, 2, \dots, l \\ \Psi_{ij} + \Psi_{ji} &< 0, i < j < l \end{aligned} \quad (2.7)$$

其中

$$\Psi_{ij} = \begin{bmatrix} QA_i^T + A_i Q + B_i Y_j + Y_j^T B_i^T & (CQ + DY_j)^T & H \\ CQ + DY_j & -I & 0 \\ H^T & 0 & -\gamma^2 I \end{bmatrix}$$

$i=1, \dots, l$, $j=1, \dots, l$, l 为规则数。文献[32]给出式(2.7)的详细论证, 这里不再赘述。

式(2.7)给出了式(2.5)的一个 H_{∞} 状态反馈, 且满足模糊系统稳定的条件。

2.3.2.2 含极点约束的多目标鲁棒控制

对复平面中的区域 D , 如果存在一个对称矩阵 L 和矩阵 M 使得 $D = \{s \in \mathbb{C} : L + sM + \bar{s}M^T < 0\}$, 则称 D 是一个线性矩阵不等式区域。矩阵值函数 $f_D(z) = L + sM + \bar{s}M^T$ 称为 LMI 区域的特征函数^[40-42]。

图 2.2 复平面上半径为 r , 中心在 $(-q, 0)$ 的圆盘 $D(r, q)$ 是一个 LMI 区域。因为 $D(r, q)$ 可以表示成

$$\begin{cases} D(r, q) = \{s \in \mathbb{C} : (s+q)(\bar{s}+q) - r^2 < 0\} \\ f_{D(r, q)}(s) = \begin{bmatrix} -r & q+s \\ q+\bar{s} & -r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r & q \\ q & -r \end{bmatrix} + s \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \bar{s} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^T \end{cases} \quad (2.8)$$

由 $r>0$ 可推出 $(s+q)(\bar{s}+q) - r^2 < 0$ 等价于 $\begin{bmatrix} -r & q+s \\ q+\bar{s} & -r \end{bmatrix} < 0$ 。

因此, $f_{D(r, q)}(s) = \begin{bmatrix} -r & q+s \\ q+\bar{s} & -r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r & q \\ q & -r \end{bmatrix} + s \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \bar{s} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^T$ 是区域 $D(r, q)$ 的一个特征函数。

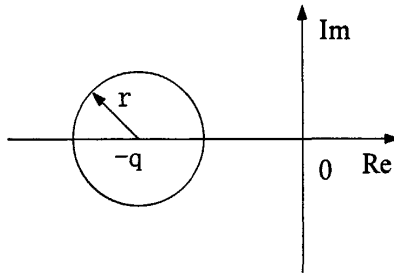


图 2.2 极点区域 $D(r, q)$

存在正定对称矩阵 Q 和矩阵 Y_i , 使得下列不等式成立

$$\begin{bmatrix} -rQ & qQ + QA_i^T + Y_i^T B_i^T \\ qQ + A_i Q + B_i Y_i & -rQ \end{bmatrix} < 0 \quad (2.9)$$

则闭环系统是 D 区域稳定的, 也就是将闭环极点配置如图 2.2 所示的圆内。

多目标控制器设计的思想就是将满足不同单一目标(闭环控制系统的稳定性、 H_∞ 性能及极点区域约束的要求)的线性矩阵不等式统一到一个线性不等式组中, 通过求解满足该线性不等式组的共同的矩阵, 从而把控制器的多目标设计问题转换为线性矩阵不等式的凸优化问题, 利用 Matlab 的 LMI Toolbox 获得控制器参数, 再通过 PDC 方法得到整个系统的非线性模糊状态反馈控制器^[40,43]。

综合式(2.7)、式(2.9)将极点约束与 H_∞ 状态反馈相结合, 得

$$\begin{aligned} \Psi_{ii} &< 0, i=1, 2, \dots, l \\ \Psi_{ij} + \Psi_{ji} &< 0, i < j < l \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{bmatrix} -rQ & qQ + QA_i^T + Y_i^T B_i^T \\ qQ + A_i Q + B_i Y_i & -rQ \end{bmatrix} < 0$$

其中

$$\Psi_{ij} = \begin{bmatrix} QA_i^T + A_iQ + B_iY_j + Y_j^T B_i^T & (CQ + DY_j)^T & H \\ CQ + DY_j & -I & 0 \\ H^T & 0 & -\gamma^2 I \end{bmatrix}$$

$i=1, \dots, l, j=1, \dots, l, l$ 为规则数。

式(2.10)给出了式(2.5)的一个 H_∞ 状态反馈, 满足模糊系统稳定条件的同时, 将系统的极点约束在一定的区域内, 使系统具有期望的过渡过程。

2.4 动态系统基于模糊模型相除补偿(CDF)设计方法

PDC 方法应用的难点在于, 当模糊推理规则数较大时, 很难求得满足稳定性要求的公共正定对称矩阵 P 。文献[44]提出模糊模型相除补偿技术(Compensation and Division for Fuzzy Models, CDF), 利用该方案可以消除耦合项, 得到的系统的控制律保守性小。

全局系统的状态方程重写如下

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^l h_i(x) [A_i x(t) + B_i u(t)]$$

全局模糊系统控制器为

$$u(t) = -\sum_{i=1}^l h_i(x) k_i x(t)$$

取 Lyapunov 函数为

$$V(x(t)) = x^T(t) P x(t) \quad (2.11)$$

求 $V(x(t))$ 对时间的导数得

$$\dot{V}(x(t)) = \sum_{i=1}^l h_i(x) x^T(t) (A_i^T P + P A_i) x(t) + 2 \sum_{i=1}^l h_i(x) x^T(t) P B_i u(t) \text{ 代入式(2.11)得}$$

$$\dot{V}(x(t)) = \dot{x}^T(t) P x(t) + x^T(t) P \dot{x}(t)$$

$$= \sum_{i=1}^l h_i(x) x^T(t) (A_i^T P + P A_i) x(t) + 2 \sum_{i=1}^l h_i(x) x^T(t) P B_i u(t) \quad (2.12)$$

$$= \sum_{i=1}^l h_i(x) x^T(t) (A_i^T P + P A_i) x(t) - 2 \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l h_i(x) h_j(x) x^T(t) P B_i K_j x(t) \quad (2.13)$$

显然式(2.13)存在耦合项 $\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l h_i(x) h_j(x) x^T(t) P B_i K_j x(t)$ 可以通过对式(2.12)第二项

除以 $\sum_{i=1}^l h_i(\mathbf{x}) \mathbf{B}_i^T \mathbf{P} \mathbf{x}(t)$ 得以消除, 当 $\sum_{i=1}^l h_i(\mathbf{x}) \mathbf{B}_i^T \mathbf{P} \mathbf{x}(t) \neq 0$ 时, 将 $\mathbf{u}$ 代入式(2.12)得

$$\begin{aligned} \dot{V}(\mathbf{x}(t)) &= \dot{\mathbf{x}}^T(t) \mathbf{P} \mathbf{x}(t) + \mathbf{x}^T(t) \mathbf{P} \dot{\mathbf{x}}(t) \\ &= \sum_{i=1}^l h_i(\mathbf{x}) \mathbf{x}^T(t) (\mathbf{A}_i^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_i - 2\mathbf{P} \mathbf{B}_i \mathbf{K}_i) \mathbf{x}(t) \end{aligned} \quad (2.14)$$

闭环系统稳定得充分条件为 $\dot{V}(\mathbf{x}(t)) < 0$, 所以 $\mathbf{A}_i^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_i - 2\mathbf{P} \mathbf{B}_i \mathbf{K}_i < 0$, 即为

$$\mathbf{A}_i^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_i - \mathbf{P} \mathbf{B}_i \mathbf{K}_i - \mathbf{K}_i^T \mathbf{B}_i^T \mathbf{P} < 0, \quad (i=1, 2, \dots, l) \quad (2.15)$$

两边同时乘以 $\mathbf{P}^{-1}$, 令 $\mathbf{X} = \mathbf{P}^{-1}$, $\mathbf{M}_i = \mathbf{K}_i \mathbf{X}$ 则上式等价于求 $\mathbf{X} > 0$ 和 $\mathbf{M}_i$ 使得下列不等式组成立

$$\forall i(i=1, 2, \dots, l), \mathbf{X} \mathbf{A}_i^T + \mathbf{A}_i \mathbf{X} - \mathbf{B}_i \mathbf{M}_i - \mathbf{M}_i^T \mathbf{B}_i^T < 0 \quad (2.16)$$

这种控制器的设计变成了寻找矩阵 $\mathbf{X} > 0$, 满足 l 个线性矩阵不等式的问题。该方法与传统 PDC 方案相比, 耦合项得以消除, 只需用求解 l 个 LMI, 但也因此使得所得到的控制律受到的约束减小, 难以满足一定的动态性能要求。

2.5 小结

本章简单介绍了模糊控制的发展, 以及 T-S 模糊模型的特点及构成。阐述了 T-S 模糊系统的稳定性理论, 以及基于线性矩阵不等式(LMI)的控制器设计方法。模糊动态系统的控制器的实质是一种非线性的时变状态反馈, 主要应用到的有并行分配补偿技术(PDC)和模糊模型相除技术(CDF)。与 PDC 相比, CDF 具有更小的保守性, 所须求解的 LMI 较少, 适用于规则数较多, 动态性能要求相对较低的场合。本章着重介绍了基于 PDC 的鲁棒控制器设计, 这也是本文设计电力系统稳定控制器的依据。

3 一类简单电力系统的模糊 H_∞ 混沌控制

3.1 前言

电力系统是一个极其复杂的非线性不确定大系统。电力系统的不确定表现在诸多方面：实际运行点总是漂移不定、运行方式复杂多变、某些系统元件难以精确建模等。周期性负荷扰动是实际电力系统中广泛存在的一种扰动，具有一定的不确定性。电力系统作为一个典型的非线性系统，在遭受周期性负荷扰动时，只要周期性负荷的幅值、频率满足一定条件，就有可能发生混沌振荡^[45,46]。

混沌现象有多种特征，其基本特征之一，就是系统的状态轨线对于初始条件的极端敏感性。一般来讲，对于一个确定的动力学系统，一个初始状态只有一个确定的解，即一个确定的运动。但在系统进入混沌状态时，情况就完全不同了，两个相距为无穷小的初始点所对应的轨线可能相差极大。尽管混沌现象的发生未必都使稳定性破坏，但总是对系统的安全构成威胁，应该采取措施来抑制它。

由于电力系统运行的复杂性和不确定性，以及对混沌理论本身的研究还不完善，在电力系统中一定还有许多的混沌现象没有被发现，其中有些甚至有可能导致灾难性后果。这一切均需要靠科技工作者不懈的努力和探索。如何对电力系统中的混沌现象实施有效的控制已成为电力工作者必须面对的迫切任务之一。文献[46,47]具体描述了电网混沌振荡现象的发生机理并区分了混沌振荡和系统失稳的差异，通过对一非线性电力系统振荡模型的分析，利用动力系统分岔理论，证实了仅有阻尼而无周期性负荷扰动时，系统不会出现混沌振荡；在受到幅值较大的周期性负荷扰动时，系统将出现混沌振荡；在周期性负荷扰动下，当阻尼系数接近某个数值时，系统也将出现混沌振荡。还获得了系统发生振荡的参数条件，从而为大偏差状态下保障动力系统稳定提供了理论依据和计算方法。

混沌振荡已成为电力系统稳定性研究的重要课题，而今，非线性科学的发展为这方面的研究提供了更多方法。研究人员渴望对电力系统复杂振荡现象进行数学化描述，把握振荡发生的机理和参数条件，从规律上认识混沌振荡，试图找到抑制混沌振荡的有效方法并设计比电力系统稳定器更加优越的电力系统控制器。文献[48]通过合理配置 PSS 参数提供了正阻尼，能够有效抑制混沌的发生。混沌的控制问题既具有控制系统的一般性又具有其特殊性，这已引起广大科技工作者的关注。关于混沌控制的研究，近几年在国内外刊物上已有多篇论文出现，其控制方法有的是将成熟的控制理论移植到混沌系统的控制，有的则提出针对混沌系统的崭新的理论方法。电力系统中混沌的稳定控制的研究依赖于控制理论和混沌控制理论本身的发展和完善。

3.2 系统模型描述

本文针对一类存在周期性负荷扰动的简单电力系统进行分析,并针对该情况设计控制器。简单互联电力系统接线图如图 3.1 所示。其中, S1 为系统 1 的等值发电机; S2 为系统 2 的等值发电机; 3 为系统 1 的等值主变压器; 4 为系统 2 的等值主变压器; 5 为系统等值负荷; 6 为装设在线路两端的断路器; 7 为 S1、S2 之间的联络线。

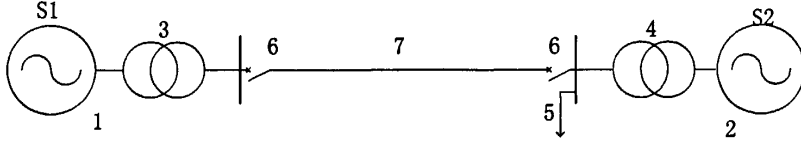


图 3.1 简单互联系统

具有周期性负荷扰动的简单电力系统数学模型如下^[1]

$$\begin{cases} \dot{\delta}(t) = \omega(t) \\ \dot{\omega}(t) = -\frac{1}{H} P_s \sin \delta(t) - \frac{D}{H} \omega(t) + \frac{1}{H} P_m + \frac{1}{H} P_e \cos \beta t \end{cases} \quad (3.1)$$

式中, $\delta(t)$ 为等值发电机 q 轴电势之间相对角度; $\omega(t)$ 为发电机转速; P_m 和 P_s 分别为发电机机械功率和电磁功率; H 为等值转动惯量; D 为等值阻尼系数; P_e 为扰动功率幅值; β 为扰动功率频率。设 $\delta(t)$ 、 $\omega(t)$ 为系统的状态变量。

对式(3.1)做时间尺度的变换, 即令

$$t = \frac{1}{\sqrt{P_{\max}}} \tau$$

则, 式(3.1)可转化成以下二阶微分方程

$$\frac{d^2 \delta}{d\tau^2} + D' \frac{d\delta}{d\tau} + \sin \delta = P'_m + P'_e \sin \beta' \tau \quad (3.2)$$

式中

$$D' = \frac{D}{\sqrt{HP_{\max}}}, \quad P'_m = \frac{P_m}{P_{\max}}, \quad P'_e = \frac{P_e}{P_{\max}}, \quad \beta' = \frac{\beta}{\sqrt{P_{\max}}}。$$

式(3.2)是一种标准的具有发生混沌现象可能性的非线性系统^[1]。

3.3 非线性模糊控制器设计

3.3.1 建立模糊模型

令 $\delta(t) = x_1$, $\omega(t) = x_2$, 则式(3.1)等价于^[49]

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1)x_1 + a_2x_2 + w + u \end{cases} \quad (3.3)$$

其中

$$f(x) = \begin{cases} a_1 \frac{\sin(x)}{x}, & x \neq 0 \\ a_1, & x = 0 \end{cases}, \quad w = \frac{1}{H} P_e \cos \beta t.$$

将此系统写成状态空间形式如下

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_1 x(t) + B_w w + B_1 u(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Dw \end{aligned}$$

其中, $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ f(x) & a_2 \end{bmatrix}$; $B = [0 \quad 1]^T$; $B_w = [0 \quad 1]^T$ 。

系统 1 中的参数分别取为 $H=100$, $P_e=100$, $D=2$, $P_m=20$, $\beta=1$ 。根据式(3.3)

可以得到

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.4546 & -0.02 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -0.02 \end{bmatrix}, \quad B_1 = B_2 = [0 \quad 1]^T, \quad B_w = [0 \quad 1]^T.$$

则系统的模糊 T-S 模型表述为

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r f_i(z(t)) \times \{A_i x(t) + B_i u(t)\}$$

$$f_1(z(t)) = \sin(x_1)/x_1, \quad f_2(z(t)) = 1 - f_1(z(t)).$$

3.3.2 控制器设计

控制器 1

以上建立了系统(3.1)的 T-S 模糊模型, 通过求解式(2.7)可以求得系统的 γ -次优 H_∞ 状态反馈控制器。进一步通过对 γ 的搜索, 可以求得使得闭环系统的扰动抑制度 γ 最小化的控制器, 称为最优 H_∞ 控制器。这里取 $\gamma=1$, 利用 MATLAB 解式(2.7)得

$$Q = \begin{bmatrix} 0.4256 & -0.5605 \\ -0.5605 & 1.2298 \end{bmatrix}, \quad K_1 = [-12.5033 \quad -9.7167] \\ K_2 = [-11.9579 \quad -9.7167]$$

控制器 2

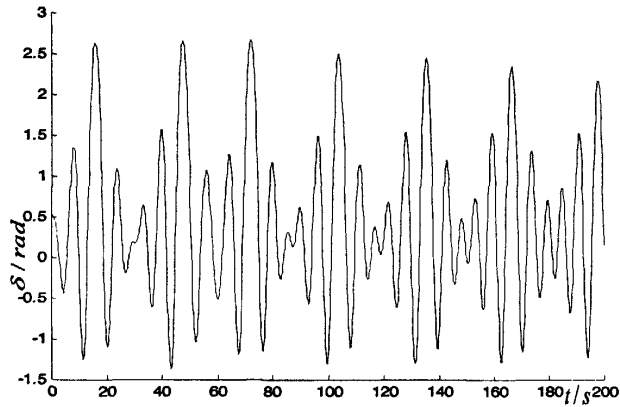
采用文献[49]所述方法, 解式(2.16)得

$$Q = \begin{bmatrix} 81.9103 & -32.7641 \\ -32.7641 & 81.9103 \end{bmatrix}, \quad K_1 = [-0.9740 \quad -1.0514] \\ K_2 = [-0.4286 \quad -1.0514]$$

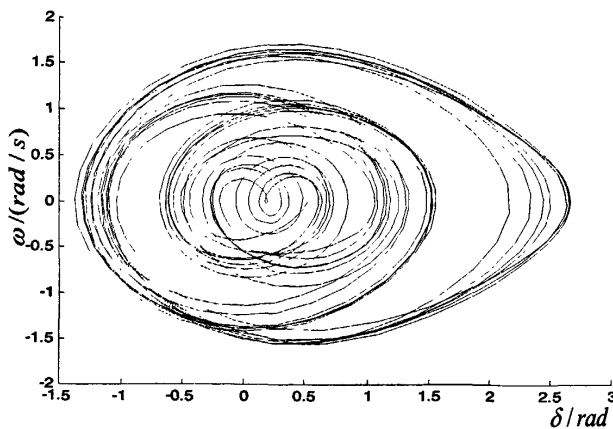
3.4 数值仿真计算与分析

在电力系统中,即使是简单的单机无穷大系统模型,也存在着混沌现象^[45]。进一步的研究还表明,电压崩溃,低频振荡和暂态稳定性都与混沌有着或多或少的关系。文献[46,47]用 Melnikov 计算分析了系统产生混沌的条件,表明在一定的耗散和周期激励下,经典模型下的 2 机系统会出现混沌现象。

对于系统(3.1),当 $P_e = 25.81$ 时,由系统的相图和功角变化的响应曲线可知系统处于混沌状态,呈不规则振荡状态。当 $P_e = 25.82$ 时,系统不仅处于混沌状态,而且在 $t = 75s$ 时已经失去稳定。严重影响了电力系统的安全稳定运行,必须采取适当措施来抑制这种现象。

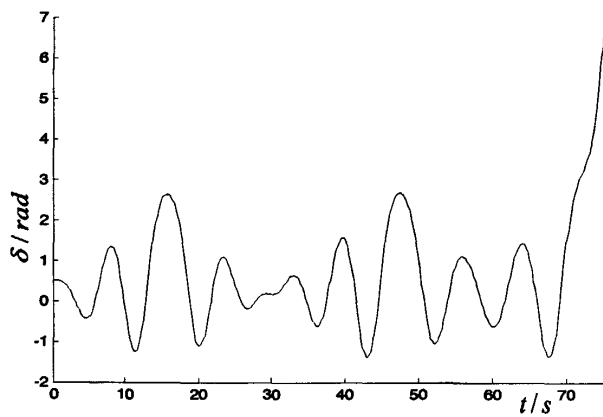


(a) $\Delta\delta(t)$ 曲线

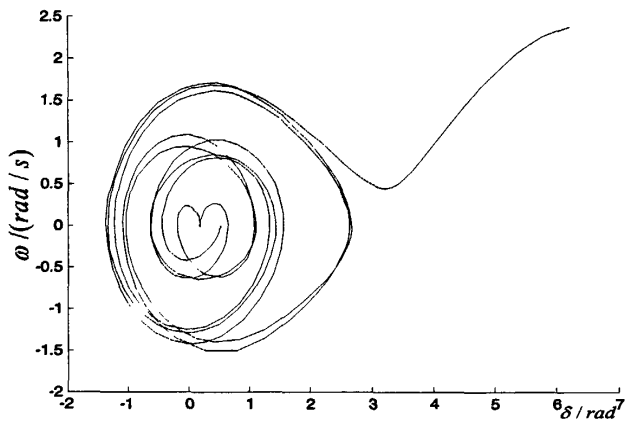


(b) 相图

图 3.2 $P_e = 25.81$ 时系统的响应

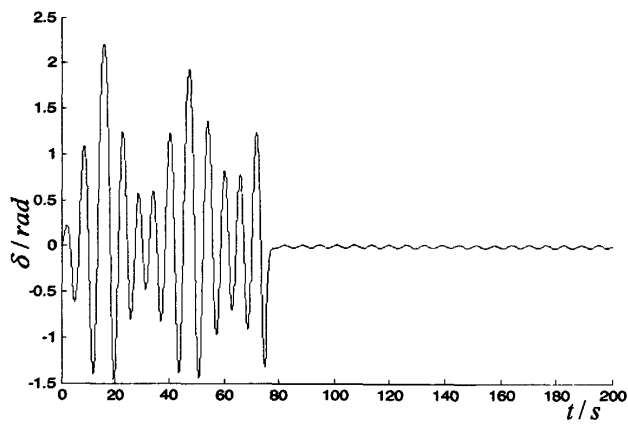


(a) $\Delta\delta(t)$ 曲线



(b) 相图

图 3.3 $P_e = 25.82$ 时系统的响应



(a) $\Delta\delta(t)$ 响应曲线

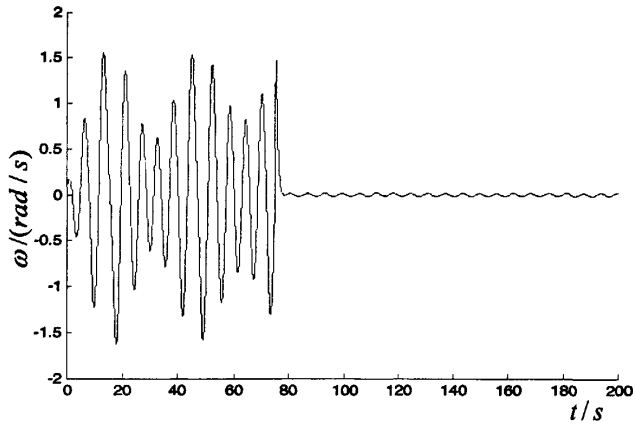
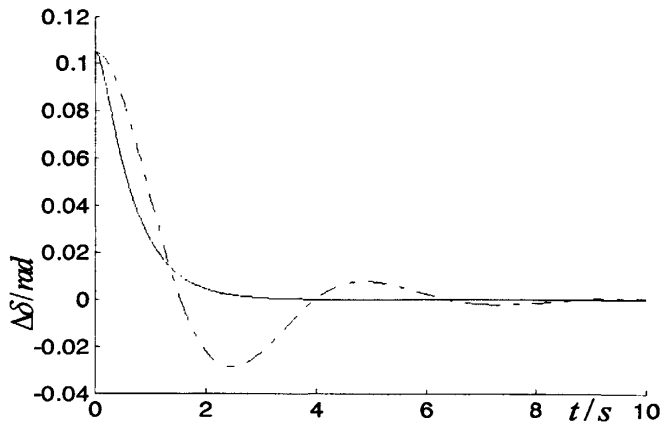
(b) $\Delta\omega(t)$ 响应曲线

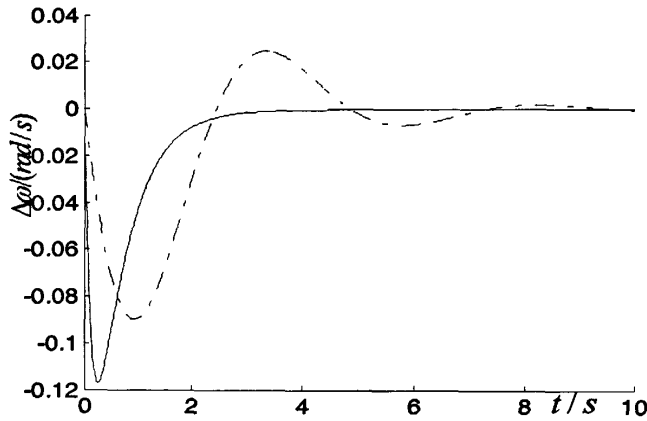
图 3.4 控制器作用下系统响应曲线

施加本文设计的 H^∞ 控制器后, 系统的响应如图 3.4 所示。 H^∞ 控制器对不确定周期性负荷扰动有很好的抑制作用, 能够破坏系统产生混沌振荡的条件。施加本文所设计的控制器后, 系统可以从混沌状态迅速过渡到稳定的周期轨道上, 且周期轨道的振幅很小。

在 $P_e=0$ 的情况下, 即当系统不存在周期性负荷扰动时, 对以下两种情况进行仿真(图中实线为本文设计的控制器的控制效果, 虚线为文献[49]中控制器的控制响应)

- (1) 在 $t=0$ 时, S_1 发生机械功率跃变, 0.15s 后恢复初始状态;
- (2) $t=1$ 秒时, 在靠近 S_1 的线路始端发生三相短路, 此时 $P_e=0$, 1.1 秒时故障消失, 恢复至故障前状态。

(a) $\Delta\delta(t)$ 曲线

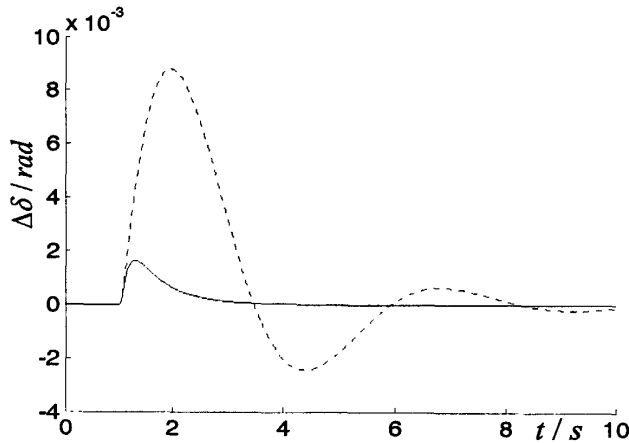


(b) $\Delta\omega(t)$ 角速度变化

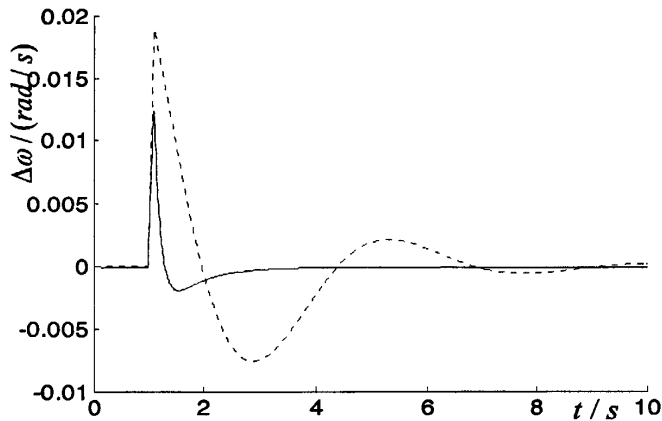
图 3.5 情况 1 系统的响应曲线

从图 3.5 可以看出, 本文所设计的控制器较好平息了小扰动造成的系统振荡, 响应时间短, 提高了系统的静态稳定性能。图 3.6 则表明, 发生三相短路时控制器仍能保持系统稳定, 且超调小, 响应速度快, 具有较好的动态性能。

综合图 3.4-3.6 可以看出, 本文设计的模糊 H_∞ 控制器能够增加系统阻尼, 消除混沌。并且在系统不存在周期性负荷扰动时, 能够提高系统的静态和暂态稳定性能。而文献[49]采用 CDF 得到的系统控制律, 由于该方法仅考虑了系统的稳定性, 减弱了对线性矩阵不等式的约束, 从而也减弱了对动态性能的约束。



(a) 功角差 $\Delta\delta(t)$



(b)角速度差 $\Delta\omega(t)$

图 3.6 情况 2 仿真曲线

3.5 小结

本章通过数值仿真给出了一类含周期性负荷扰动的二机电力系统的一种特殊运行状态——混沌。借鉴文献[49]中的方法建立了该系统的T-S模糊动态模型，设计了非线性 H^∞ 控制器。

当存在周期性扰动时，所设计的 H^∞ 控制器能有效增加系统的阻尼，抑制该扰动对系统的影响，避免了混沌的发生。但另一方面正是因为这一扰动的存在，在该控制器作用下系统只能进入某一稳定的周期轨道。忽略该周期性负荷扰动时，本章所设计的控制器能够有效改善系统的动态品质。Matlab数值仿真验证了控制器的有效性。

4 TCSC 非线性多目标稳定控制器设计

4.1 前言

上世纪 80 年代, 柔性交流输电系统(FACTS)的出现为现代电力系统的安全、经济、可靠和优质运行提供了十分有效的手段。与电力系统传统的阻抗控制元件、功角控制元件以及电压控制元件不同, FACTS 技术基于电力电子技术, 对交流系统中的电压、无功、电抗和相角都可以进行控制, 从而能实现对交流系统潮流分布的直接灵活控制, 有效提高交流系统的安全稳定性。FACTS 在电力系统中的主要功能归纳为以下几类^[61]: 较大范围地控制潮流, 使之按指定路径流动; 提高输电线路的功率传输极限; 减少发电机的热备用; 依靠限制短路和设备故障的影响防止线路串级跳闸; 阻尼那些影响电力系统安全稳定运行的各种振荡。

FACTS 技术的引进将原来基本不可控的电网变得全面可控, 从而大大地提高了电力系统的调度灵活性和安全稳定性, 满足电力系统长距离、大功率安全稳定输送电力的要求。利用 FACTS 调节的快速性, 可在系统紧急情况下, 迅速地调整电力网络的潮流分布, 使潮流向仍有输电潜力的线路转移, 这样可以大大降低系统失稳的概率。

可控串联电容补偿(Thyristor Controlled Series Compensator, TCSC)作为一种重要 FACTS 的装置, 它可以快速、连续、平滑地改变线路阻抗, 从而实现对整条输电线路电抗的平滑调节和动态响应的控制。1992 年, 美国亚利桑那州的 Kayenta 变电站安装了西门子公司制造的部分可控串联电容补偿器, 是世界上第一个可控串补工程项目。目前, 国际上已有许多将 TCSC 应用于系统中的实例。国内也对此进行了大量研究, 2003 年 7 月国内第一套 500kV 可控串补在天广线平果站投入运行。2004 年 12 月国家电网公司重大科研项目, 甘肃碧成 220kV 可控串补国产化示范工程项目一次投运成功, 暂态稳定极限增加 33%, 抑制功率振荡效果十分明显^[50]。作为串联补偿装置的 TCSC 在电力系统中的功能主要包括^[50]:

(1) 潮流控制: 能优化平行输电线路和不同电压等级线路的负载潮流, 同时使系统总的损耗最小;

(2) 消除次同步振荡: 次同步振荡是输电线路在一定运行条件下和串联补偿度相关的一种谐振现象, 消除次同步谐振的危险意味着 TCSC 的使用范围的扩大;

(3) 阻尼线路功率振荡、提高电压稳定性: 能增加系统容量, 提高已有线路和新建线路的输电能力, 从而用更少的线路输送更多电能, 节省资金, 对环境保护也有一定好处。

在整个电力线路中, TCSC 就是一个可控的电力电子元件, 通过对其晶闸管开关的控制达到调节线路阻抗的目的。

TCSC 方案的实质是一个电容值连续可变的电容器,而 TCSC 等效电容的调节是通过改变可控硅的触发角来实现的。与常规的串联电容补偿相比,TCSC 具有以下明显的优点:采用电子式的开关操作,理论上可以进行无数次操作而没有机械磨损;控制速度很快;串联补偿程度可断续、连续地调节。使用 TCSC 可大大提高系统控制的灵活性和可靠性。

4.2 TCSC 控制器

控制器是设计 TCSC 装置的关键,其性能的优劣直接影响整个系统的运行性能。由于系统对 TCSC 控制器响应速度的不同,以系统对控制命令的响应时间作为依据,将 TCSC 控制器分为底层、中层和上层控制^[51]。

底层控制就是取 TCSC 模块本身参数变量作为控制输入,实施对晶闸管触发角控制,响应速度快,便于实现阻抗控制。该层次的功能主要通过控制器硬件和逻辑结构来实现。

中层控制也叫阻抗控制,是 TCSC 的基本控制功能,电力系统潮流控制和其它上层控制的功能通过阻抗控制来实现。

上层控制也叫稳定控制,是实现暂态稳定控制,增加功率摇摆时的系统阻尼,并根据具体控制策略取不同系统变量为反馈量。

4.2.1 TCSC 阻抗控制

TCSC 对电力系统的控制是基于 TCSC 快速调节其阻抗的能力,阻抗控制性能的优劣直接影响整个控制系统的响应速度与稳定性。TCSC 阻抗控制分为开环控制与闭环控制。

(1) 开环控制

开环控制实际上就是根据命令容抗值 X_{ord} ,得到相应的触发表,用于控制晶闸管导通。但是,开环控制时命令电抗对调节时间和超调量有较大的影响。所谓命令电抗就是控制策略所要求的电抗。由于没有反馈量实时修正,需要较长的调节时间,超调也难以满足要求,命令阻抗越大,调节效果越差。因此开环阻抗控制难以满足暂态稳定控制的要求。

(2) 闭环控制

闭环阻抗控制能够改善 TCSC 响应的动态性能,提高控制的精度,除了有开环控制的查表过程外,触发角还能依据反馈量进行实时修正。采用闭环阻抗控制(如 PID 控制)后,相应的调节时间和超调量都有所减小。

当同步信号取线路电流时,通过模拟仿真来观察闭环阻抗控制时 TCSC 的阶跃响应,发现 TCSC 的暂态特性可近似表示为一个一阶惯性环节,闭环控制具有更快的响应

速度。

4.2.2 TCSC 稳定控制

稳定控制有两个目标,其中之一是在电力系统受到大干扰后,保证发电机的同步运行;还有就是在交流系统发生振荡时,增加系统抑制振荡的阻尼。TCSC 的稳定控制器及其理论分为两种:阻尼系统振荡类型和暂态稳定控制类型。

阻尼系统振荡类型的 TCSC 控制器都适用于暂态稳定控制。相反,以暂态稳定控制为目标的控制器就不一定可用来阻尼系统的机电振荡。

文献[52]通过对多机电力系统进行等值处理,应用直接大范围线性化的方法,设计了一种只需当地测量量进行反馈的可控串联补偿电容非线性控制器,并提出了一种确定系统等值参数的优化方法,以提高其控制性能。文献[53]应用直接反馈线性化和 H_∞ 控制理论,设计了一种多机系统 TCSC 多目标 H_∞ 控制器,采用该控制器可以满足系统功角稳定性、频率稳定性、控制系统消耗能量最小等多种目标。同时,该控制器可以抑制干扰,很好地适应系统运行方式的变化。文献[54]针对受外部干扰的含 TCSC 的多机系统,运用逆推(Backstepping)控制方法设计了 TCSC 鲁棒控制器,仿真结果表明该控制器不仅能保证系统状态收敛,而且能够抑止干扰对系统输出的影响。

4.3 系统模型描述

4.3.1 TCSC 数学模型

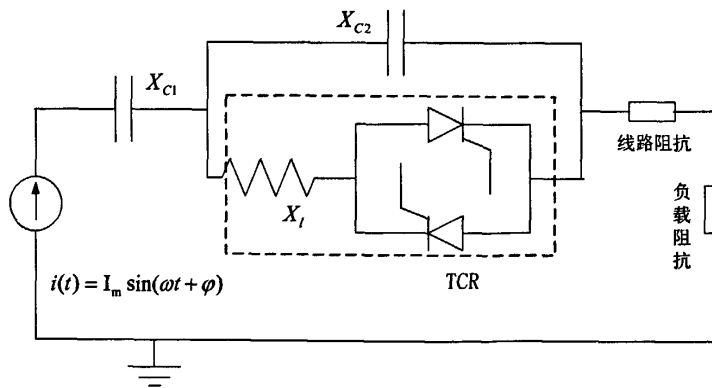


图 4.1 TCSC 简化等值电路

TCSC 装置简化等值电路如图 4.1 所示,它包括两个部分:固定的电容 X_{C1} , 以及与晶闸管控制电抗器(TCR)支路并联的电容 X_{C2} 。通过对触发脉冲的控制,改变晶闸管的触发角,即可改变由其控制的电感支路中电流大小,因而可以连续改变总的等效电抗,也即能够使线路的串补值连续变化。

TCSC 阻抗表达式写为^[55]

$$X_{TCSC} = \frac{(I_M - I_{LM})}{I_M} \times \frac{1}{\omega C} \quad (4.1)$$

其中, I_M 为线路电流峰值, I_{LM} 为电感电流基波分量幅值, ω 为系统频率, C 为电容。

令 TCSC 的阻抗值在一定范围内可以任意调节, 用时间常数为 0.05 s 的一阶惯性环节来模拟 TCSC 控制系统的动态, 如图 4.2 所示。

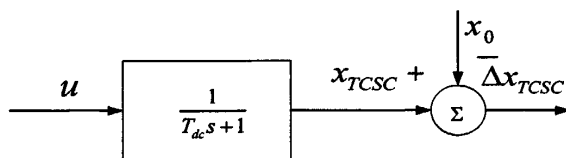


图 4.2 TCSC 对线路阻抗的调节作用

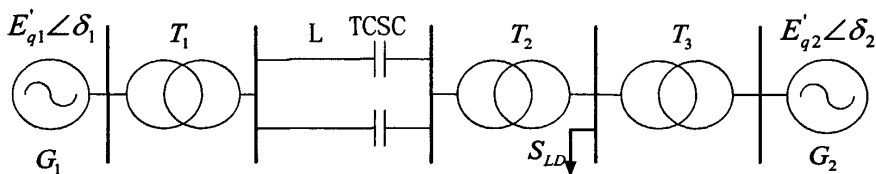
x_0 为可控串补的给定值, T_{dc} 为调节过程的等效时间常数, u 为控制变量, 经过拉氏变换, 其状态方程可表示为

$$\dot{x}_{TCSC} = (-x_{TCSC} + x_0 + u)/T_{dc} \quad (4.2)$$

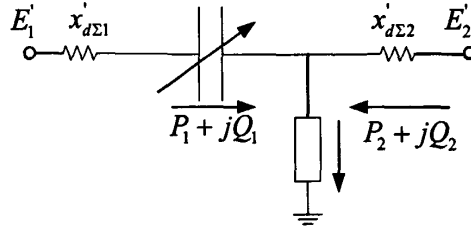
当触发角改变后, TCSC 要经过调节才能达到稳定运行状态。这是因为电容中存储的能量要重新补充或释放, 这个过渡过程需要经过一段时间, 且必须与 TCR 支路发生相互作用, 并以振荡的形式表现出来。

在触发角较小, 且采用固定触发角控制方式的情况下, 这个过渡过程的持续时间较长, 对系统得稳定造成的影响无法忽略。此时, 控制系统在过渡过程中的作用则显得至关重要。通常的暂态稳定模型中, 将 TCSC 以与线路串联的稳态基波阻抗来表示, 并且假设控制系统具有理想的特性, 从而忽略了 TCSC 固有的暂态过程, 这个假设一般很难满足。

4.3.2 含 TCSC 系统模型



(a) 两区域电力系统连接图



(b) 等效电路图

图 4.3 含 TCSC 的电力系统模型

含 TCSC 的多机系统其等值为两机系统接线图和等值电路如图 4.3 所示。在设计控制器时, 发电机采用暂态电抗后电势 E' 恒定、机械功率保持不变的经典模型, TCSC 采用变阻抗模型, 并忽略系统电阻。

发电机采用暂态电抗 x'_d , 后电势 E'_q 恒定、输入机械功率保持不变, 用一个恒定阻抗表示负荷的模型。发电机的电磁功率是两台发电机相对角的函数, 电磁功率用下式表示

$$\begin{aligned} P_{E1} &= E_1'^2 G_{11} + E_1' E_2' (G_{12} \cos \delta_{12} + B_{12} \sin \delta_{12}) \\ P_{E2} &= E_2'^2 G_{22} + E_1' E_2' (G_{12} \cos \delta_{12} - B_{12} \sin \delta_{12}) \end{aligned} \quad (4.3)$$

上式中的电纳值较小, 一般可以忽略。这样, 对于图 4.3 的系统, 其电磁功率为^[52,53]

$$P_{e1} = -P_{e2} = \frac{E_{q1}' E_{q2}' \sin(\delta_1 - \delta_2)}{x_{TCSC} + x_{\Sigma}} \quad (4.4)$$

式中, $x_{\Sigma} = x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x'_{1d} + x'_{2d}$ 。

这样, 系统的状态方程为^[52,53]

$$\begin{cases} \dot{\delta}_1 = \omega_1 - \omega_{10} \\ \dot{\omega}_1 = \frac{\omega_{10}}{H_1} (P_{m1} - P_{e1}) + \frac{\omega_{10}}{H_1} \varepsilon_1 \\ \dot{\delta}_2 = \omega_2 - \omega_{20} \\ \dot{\omega}_2 = \frac{\omega_{20}}{H_2} (P_{m2} - P_{e2}) + \frac{\omega_{20}}{H_2} \varepsilon_2 \end{cases} \quad (4.5)$$

其中, $\delta_1, \delta_2, \omega_1, \omega_2, P_{m1}, P_{m2}, P_{e1}, P_{e2}, H_1, H_2$ 分别是发电机 G_1, G_2 转子角、转子角速度、机械功率、电磁功率和转动惯量; ω_{10}, ω_{20} 分别为发电机 G_1, G_2 的额定转子角速度; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 为干扰集, 表示发电机转子轴上转矩的扰动。

4.4 TCSC 控制器设计及仿真

令 $x_1 = \delta_1 - \delta_2 - (\delta_{10} - \delta_{20})$, $x_2 = \omega_1 - \omega_2 - (\omega_{10} - \omega_{20}) = \omega_1 - \omega_2$, $x_3 = 1/(x_{TCSC} + x_z)$, 这些量都是装设 TCSC 处的本地量测量计算而来的, 无需信号传输^[52]。综合式(4.2)、式(4.5)系统改写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = k_1 \sin x_1 \cdot x_3 + k_2 + w \\ \dot{x}_3 = (-x_3 + x_{3[0]} + u) / T_{dc} \end{cases} \quad (4.6)$$

其中 k_1, k_2 为常数, w 为外界干扰集。

在工况运行点及 $\pm 15^\circ$ 三个运行点处得到各线性子系统。

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -9.736 & 0 & 0.878 \\ 0 & 0 & -20 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -8.631 & 0 & 1.588 \\ 0 & 0 & -20 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -6.937 & 0 & 2.190 \\ 0 & 0 & -20 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_i = [0 \ 0 \ 20]^T, \quad \mathbf{B}_{wi} = [0 \ 1 \ 0]^T.$$

则 T-S 模糊动态模型为:

Rule1: if $x_1(t)$ is about -15° and $x_2(t)$ is about 0

$$\text{then } \dot{x} = \mathbf{A}_1 x(t) + \mathbf{B}_1 u(t) + \mathbf{B}_{w1} w$$

Rule2: if $x_1(t)$ is about 0° and $x_2(t)$ is about 0

$$\text{then } \dot{x} = \mathbf{A}_2 x(t) + \mathbf{B}_2 u(t) + \mathbf{B}_{w2} w$$

Rule3: if $x_1(t)$ is about 15° and $x_2(t)$ is about 0

$$\text{then } \dot{x} = \mathbf{A}_3 x(t) + \mathbf{B}_3 u(t) + \mathbf{B}_{w3} w$$

控制器 1: 仅考虑 H_∞ 性能时取干扰抑制度 $\gamma = 1$, 利用 LMI Toolbox, 解式(2.7)得

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0.8483 & -1.8492 & -0.1079 \\ -1.8492 & 10.6274 & -25.5132 \\ -0.1079 & -25.5132 & 121.6660 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_1 = [-3.8257 \ -2.4162 \ 0.4825] \\ \mathbf{K}_2 = [-12.1109 \ -6.1727 \ -0.3126] \\ \mathbf{K}_3 = [-19.1595 \ -9.3669 \ -0.9887]$$

控制器 2: 考虑多目标控制时, 同样取干扰抑制度 $\gamma = 1$, 令极点区域 $(-q, r) = (-10, 8)$,

解式(2.10)得

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0.2912 & -0.8735 & 2.7101 \\ -0.8735 & 5.6695 & -30.5498 \\ 2.7101 & -30.5498 & 216.591 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_1 = [-2.9380 \ -4.3391 \ 0.1924]$$

$$\mathbf{K}_2 = [-5.4418 \ -5.5406 \ -0.1645]$$

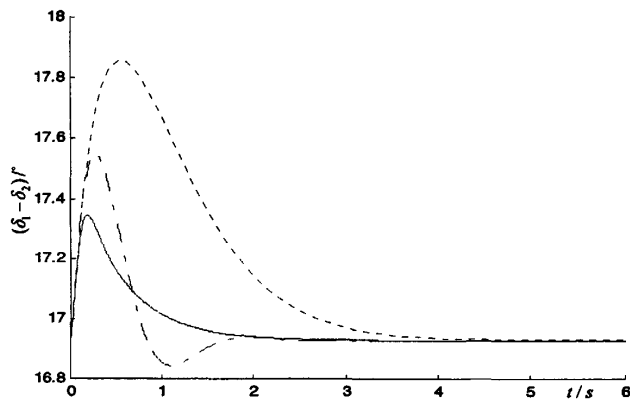
$$\mathbf{K}_3 = [-7.2277 \ -6.1800 \ -0.4381]$$

控制器 1、2 的形式如式(2.3)。

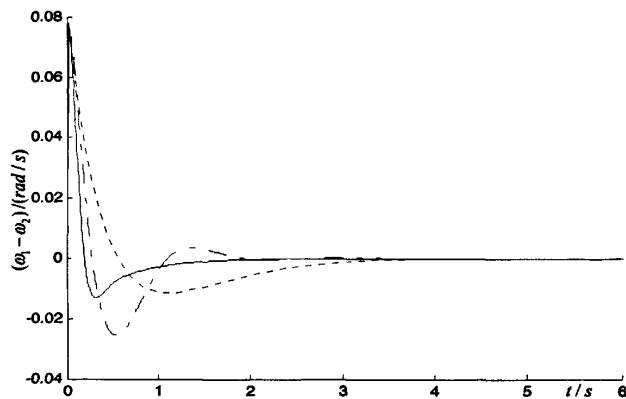
控制器 3：基于反馈线性化的非线性 H_∞ 控制^[56,57]。

$$x_{TCSC} = \frac{\left(\frac{\omega_0}{H_1} - \frac{\omega_0}{H_2}\right) E'_{q1} E'_{q2} \sin(\delta_1 - \delta_2)}{\frac{\omega_0}{H_1} P_{m1} - \frac{\omega_0}{H_2} P_{m2} + k_1 y_1 + k_2 y_2} - x_E$$

其中, $y_1 = \delta_1 - \delta_2 - (\delta_{10} - \delta_{20})$, $y_2 = \omega_1 - \omega_2 - (\omega_{10} - \omega_{20}) = \omega_1 - \omega_2$ 。



(a) 功角响应曲线



(b) 角速度响应曲线

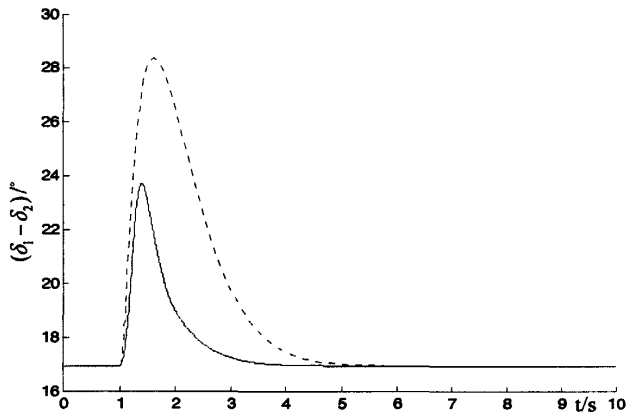
图 4.4 小扰动稳定仿真

考虑如下两种情况对系统进行仿真

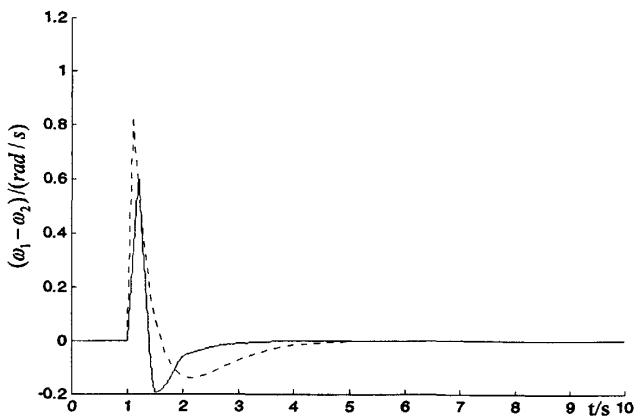
(1) 在 $t=0$ 时, G_1 发生+25%的机械功率瞬时扰动。这种情况代表系统受到小干扰后发电机组功角差偏离稳态后恢复的情况。电力系统经常处于小扰动之中, 如负荷投切及负荷波动等等。当扰动消失, 系统经过过渡后若趋于恢复扰动前的运行工况, 则称此系统在小扰动下是稳定的。仿真结果如图 4.4 所示。

(2) 在 $t=1s$ 时, 在某条线路的始端发生瞬时三相短路故障, $t=1.2s$ 时故障消失恢复至故障前运行状态。这代表系统受到大扰动时的动态响应, 仿真所图 4.5 所示。电力系统在遭受大扰动时, 表征系统运行状态的各种电磁参数都要发生急剧变化, 而三相短路又是其中最为严重的一种。

仿真过程中, 考虑到 TCSC 容抗幅值的限制, 假设 TCSC 容抗变化范围为稳态值 $\pm 0.3p.u.$ ^[63]。



(a) 功角响应曲线



(b) 角速度响应曲线

图 4.5 暂态稳定仿真分析

图 4.4 代表系统遭受小扰动时的响应。图中实线为多目标控制的系统响应, 点划线

为仅考虑 H_∞ 时的控制效果，虚线为基于反馈线性化的非线性 H_∞ 控制效果。从图中可以看出施加模糊多目标控制器的系统超调小，响应速度快，性能明显优于非线性 H_∞ 控制效果。

为了比较说明极点约束在控制过程中的作用，图 4.5 给出了系统遭受严重的大干扰时，在控制器 1、2 作用下系统的响应。图中实线为多目标控制的系统响应。从图中可以看出，在不平衡转矩作用下，系统功角和角速度迅速变化，故障切除后在本文所设计的多目标控制器作用下，系统能够很快到达稳定状态，且振荡幅度很小。与仅考虑 H_∞ 性能的控制器的相比，多目标控制具有更好的动态性能。

4.5 小结

本章基于模糊 T-S 模型，采用 PDC 技术，设计了一类多机系统 TCSC 多目标控制器。该控制器能满足闭环系统 H_∞ 性能，极点约束和稳定性的多目标要求。而基于反馈线性化的非线性设计方法，需要系统的精确模型，当反馈存在扰动时，系统性能迅速下降。MATLAB 仿真结果表明，基于模糊 T-S 模型的多目标控制能够改善系统的稳定性。并且，控制器所需的输入量都是当地可测量，因此可以很容易应用于实际系统中，易于工程实现。

5 基于 T-S 模糊模型的励磁控制器设计

5.1 前言

同步发电机励磁系统的基本功能是给发电机的励磁绕组提供合适的直流电流,以在发电机定子空间产生磁场。励磁控制器是同步发电机的的重要组成部分,控制器和它的控制对象——同步发电机,共同组成的反馈控制系统,称为励磁控制系统。

发电机励磁系统在电力系统中的作用主要有以下三方面^[6]:

(1) 提高电力系统的稳定性

励磁控制系统可以通过维持机端电压提高发电机静态稳定极限,对暂态稳定的作用在于增加人工阻尼。

(2) 调节并联运行机组间无功功率分配

多台发电机并列运行时,它们输出的有功功率决定于原动机输入的机械功率,而发电机输出的无功功率则和励磁电流有关,控制并联运行机组间无功功率分配是励磁控制系统的一项重要功能。

(3) 维持发电机端电压在给定水平

在发电机正常运行情况下,励磁系统应该能够维持发电机端电压在给定水平。通常发电机端电压会随着负荷的变化而发生改变,此时,励磁系统将自动调节发电机的励磁电流,使发电机端电压维持在要求的精度水平上。

励磁控制技术的提高总是紧紧依赖于控制理论的发展,励磁控制方式大体经历了 3 个发展阶段^[1,58-59]。

(1) 单变量控制阶段。其控制律是按发电机端电压的偏差 ΔV_t 进行 PID(比例-积分-微分)调节的。这种励磁控制方式是采用古典控制理论中的相位补偿原理进行设计的,采用这种方法是由于无法获得系统的数学模型,其控制目标是维持机端电压的稳定。由于其设计目标是单一的,因而所设计的控制器无法保证系统的动态性能。

(2) 线性多变量控制阶段。为了进一步改善电力系统的动态品质与小扰动稳定性,线性多变量反馈控制方法逐步被应用于励磁控制。具有代表性的方法就是增加了电力系统稳定器(PSS)环节的 PID 励磁控制和线性最优励磁控制(LOEC)。其中, PSS 已广泛应用于电力系统,我国学者在线性最优励磁控制方面做了大量研究,取得了不少研究成果,目前 LOEC 在我国已经入实用化阶段,有一些成功应用的实例。

(3) 非线性多变量控制阶段。线性励磁控制方式存在一个共同的问题,即控制器设计是建立在系统某一特定运行状态下的近似线性化模型的基础上的,只能保证系统的静态稳定性能。而非线性励磁控制充分考虑系统的非线性特性,所设计的励磁控制器不依赖于某一特定运行状态,能较好改善系统的静态和暂态稳定性能。理论上讲,非线性励

磁控制真实地反映了系统运行工况，因而取得了较好的控制效果。

5.2 单机无穷大系统励磁控制器设计

5.2.1 单机无穷大系统励磁系统模型

有相当数量的远距离输电系统可以简化成为单机无穷大系统来进行研究，所以把单机输电系统的控制问题加以深入的研究有着重要的意义。另外从学术上看，只有把单机输电系统的控制问题研究清楚以后，才有可能对多机系统的控制问题进行更深入的探讨，前者是后者的基础。

单机无穷大系统如图 5.1 所示，一台发电机经变压器、线路、与无穷大容量系统连接的简单系统。假设其受端母线电压的幅值和频率均不变。不失一般性，假设发电机为凸极机，采用三阶模型，可以作出系统的等值电路如图 5.1 所示，各元件的电阻及导纳均略去不计。

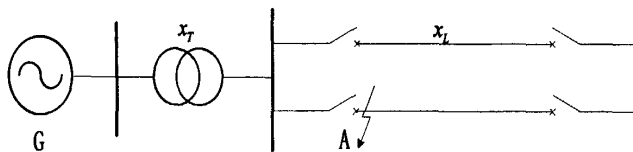


图 5.1 单机无穷大系统

任意一台发电机的转子运动方程可表示为

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \omega_n(\omega - 1) \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_j}(P_m - P_e - D(\omega - 1)) \end{cases} \quad (5.1)$$

式中， P_m 为原动机的输入功率(标么值)， P_e 为发电机电磁功率(标么值)， ω_n 为发电机转子同步角速度(弧度/秒)， T_j 为惯性时间常数(秒)， D 为综合阻尼系数， δ 为发电机功角(弧度)， ω 为发电机转子角速度(弧度/秒)。

发电机的电磁功率可以用下式来表示

$$P_e = V_d I_d + V_q I_q \quad (5.2)$$

其中， $V_d = X_q I_q$ ， $V_q = E'_q - X'_d I_d$ ， $I_d = \frac{E'_q - V \cos \delta}{X'_{d\Sigma}}$ ， $I_q = \frac{V \sin \delta}{X_{q\Sigma}}$ 。

所以， $P_e = \frac{E'_q V}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{V^2}{2} \frac{X'_{d\Sigma} - X_{q\Sigma}}{X'_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \sin 2\delta$ 。

发电机机端电压

$$V_t = \sqrt{V_d'^2 + V_q'^2} = \sqrt{\left(\frac{x_q U \sin \delta}{x_{q\Sigma}}\right)^2 + \left(\frac{x_e E_q' + x_d' V \cos \delta}{x_{d\Sigma}}\right)^2}$$

发电机励磁关系可以用以下一阶微分方程来表示

$$E_{fd} = E_q + T_{d0}' \frac{dE_q'}{dt} \quad (5.3)$$

式中, E_{fd} 为发电机空载电势的强制分量, 即发电机励磁电压, E_q 为发电机机端电势,

T_{d0}' 为励磁绕组时间常数。

用一阶惯性环节模拟励磁控制的动态

$$\dot{E}_{fd} = \frac{1}{T_e} (-E_{fd} + E_{fd0} + u) \quad (5.4)$$

综上可得包含励磁控制的简单电力系统的四阶模型如下式

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega_n (\omega - 1) \\ \dot{\omega} = \frac{1}{T_j} (P_m - P_e) - \frac{D}{T_j} (\omega - 1) \\ \dot{E}_q' = \frac{1}{T_{d0}'} (E_{fd} - E_q) \\ \dot{E}_{fd} = \frac{1}{T_e} (-E_{fd} + E_{fd0} + u) \end{cases} \quad (5.5)$$

其中, $P_e = \frac{E_q' V}{x_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{V^2 (x_{d\Sigma}' - x_{q\Sigma})}{2 x_{d\Sigma}' x_{q\Sigma}} \sin 2\delta$, $E_q = \frac{x_{d\Sigma}}{x_{d\Sigma}'} E_q' - \frac{(x_d - x_d') V}{x_{d\Sigma}'} \cos \delta$,

$$x_{d\Sigma}' = x_d' + x_T + \frac{1}{2} x_L, \quad x_{d\Sigma} = x_d + x_T + \frac{1}{2} x_L.$$

5.2.2 模糊最优励磁控制器设计

为了建立输电系统线性化的状态空间方程, 需将系统方程式(5.5)线性化, 得到系统的状态空间模型

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i u(t) \quad (5.6)$$

其中, $\mathbf{x}(t) = [\delta \quad \omega \quad E_q' \quad E_{fd}]^T$, $\mathbf{B}_i(\delta) = [0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{1}{T_e}]^T$,

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & \omega_n & 0 & 0 \\ -\frac{1}{T_j} S'_E & -\frac{D}{T_j} & -\frac{1}{T_j} R'_E & 0 \\ \frac{S_E - S'_E}{T_{d0} R_E} & 0 & -\frac{1}{T'_d} & -\frac{1}{T_{d0}} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_e} \end{bmatrix}, \text{ 式中 } S'_E, S_E, R'_E, R_E \text{ 的表达式详见文献[11]。}$$

这里选用线性二次型最优控制设计该励磁控制器^[11]。设系统状态空间方程为

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + B(t)U(t)$$

如果上式中 A 和 B 是常数矩阵, 那么该系统为线性定常系统。式中 $X(t)$ 为 n 维状态变量, $A(t)$ 为 $n \times n$ 阶状态系数矩阵, $B(t)$ 为 $n \times r$ 阶控制系数矩阵。 $U(t)$ 为 r 阶控制向量。

通常对实际系统, 性能指标采用二次型泛函为

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [X(t)^T Q X(t) + U(t)^T R U(t)] dt = J_{\min}$$

求使得指标泛函 J 达到极小值的控制规律——最优控制规律。

满足使指标泛函 J 为极小值条件的控制向量——最优控制向量

$$U^*(t) = -R^{-1} B^T(t) P(t) X(t) \quad (5.7)$$

令 $K^*(t) = R^{-1} B^T(t) P(t)$ 为最优反馈增益矩阵, 则最优控制向量可以写成

$$U^*(t) = -K^*(t) X(t)$$

上式表明: 最优控制向量 $U^*(t)$ 等于全部状态量 $X(t)$ 的线性负反馈。

对于图 5.1 所述系统, 忽略线路电容和电阻, 无穷大系统母线电压 $\dot{V} = 1 \angle 0^\circ$, 系统参数为: $x_d = 0.982$, $x'_d = 0.344$, $x_T = 0.2$, $x_L = 0.608$, $x_e = x_T + 0.5x_L$, $x'_{\text{e}} = 0.848$, $x_{\text{e}} = x_{\text{qe}} = 1.486$, $T'_{d0} = 5.0$, $D = 0.75$ 。选取 5 个特定运行点, 采用如图 5.2 所示的三角形隶属函数在 5 条模糊规则下得到单机电力系统的模糊 T-S 模型。

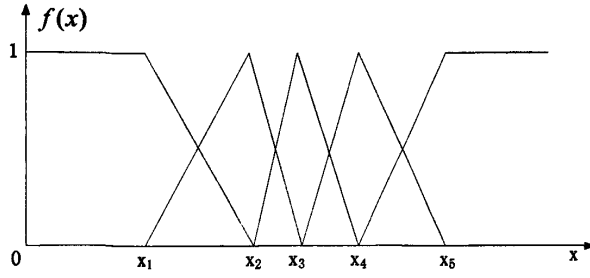


图 5.2 隶属度函数

代入上述数据得

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & \omega_n & 0 & 0 \\ -0.2235 & -0.075 & -0.0498 & 0 \\ -0.0654 & 0 & -0.3505 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0 & -2.5 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & \omega_n & 0 & 0 \\ -0.1159 & -0.075 & -0.089 & 0 \\ -0.1136 & 0 & -0.3505 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0 & -2.5 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0 & \omega_n & 0 & 0 \\ -0.0989 & -0.075 & -0.0571 & 0 \\ -0.0729 & 0 & -0.3505 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0 & -2.5 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 0 & \omega_n & 0 & 0 \\ -0.0811 & -0.075 & -0.1108 & 0 \\ -0.1414 & 0 & -0.3505 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0 & -2.5 \end{bmatrix}$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} 0 & \omega_n & 0 & 0 \\ -0.0524 & -0.075 & -0.1179 & 0 \\ -0.1414 & 0 & -0.3505 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0 & -2.5 \end{bmatrix}$$

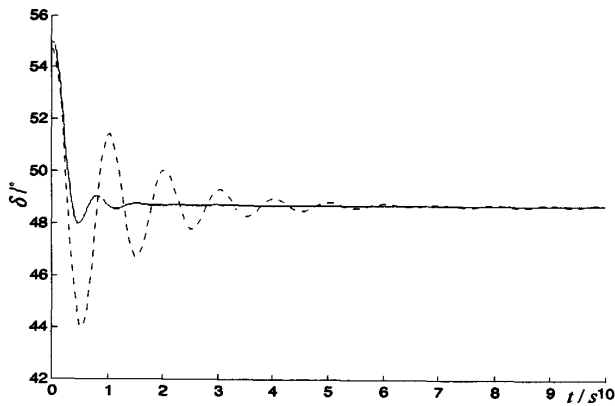
这样便可以由式(5.4)得到各个子系统的最优控制律，整个励磁系统的控制律由式(2.3)得到。

5.2.3 数值仿真分析

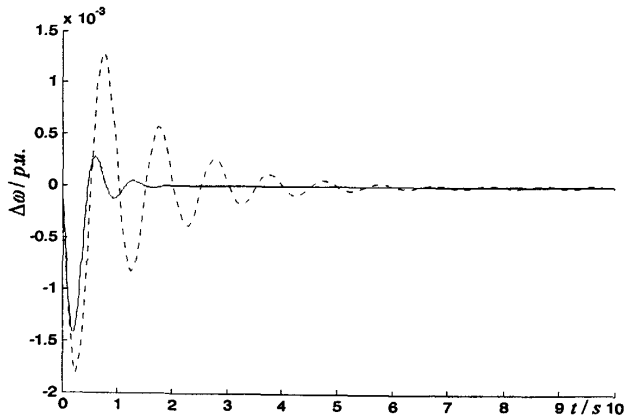
利用 MATLAB 软件进行仿真。静态稳定仿真初始运行时发生功角扰动，初值为 $\delta_{[0]} = 55^\circ$ 。暂态稳定仿真过程，1 秒时在图 5.1 所示的单机无穷大系统的 A 点发生可恢

复性三相短路故障, 1.1 秒时故障消失。所选取的稳定平衡点与静态仿真中的相同(图中虚线为线性二次型最优励磁控制, 实线为本文设计的控制)。

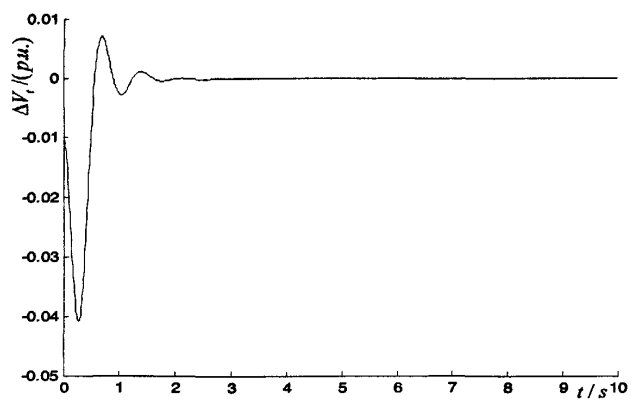
图 5.3 表明, 电力系统受到功角扰动时, 在本文所设计的控制器作用下系统能够很快平息振荡, 回到初始运行状态, 保证了电力系统的静态稳定性能且能够维持系统电压在 $\pm 5\%$ 以内。从图 5.4 中可以看出, 恒定反馈系数的最优励磁控制, 难以同时满足暂态稳定控制中, 维持系统故障后不失稳和阻尼故障后功率振荡的不同的控制要求。系统在发生三相短路故障后在本文设计的最优励磁控制作用下, 能很快回到初始平衡状态, 进入稳定运行状态。



(a) 功角响应曲线

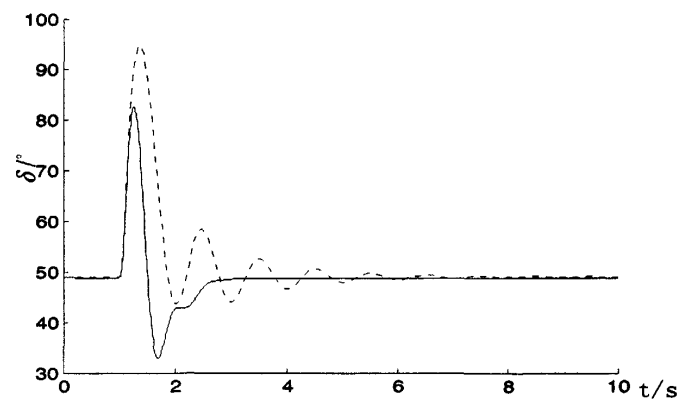


(b) 角速度响应曲线

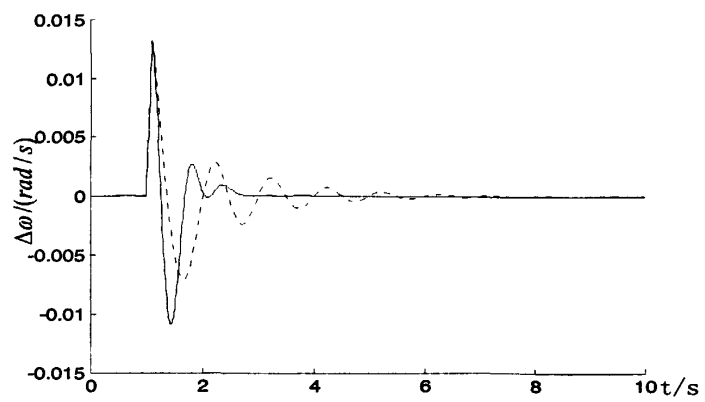


(c) 机端电压变化曲线

图 5.3 系统静态响应曲线



(a) 功角响应曲线



(b) 角速度响应曲线

图 5.4 系统暂态稳定仿真

图 5.3 和图 5.4 的结果表明基于 T-S 模型的最优励磁控制能够有效平息振荡，动态性能良好，且效果优于线性最优励磁控制。

5.3 多机系统模糊多目标励磁控制器设计

5.3.1 多机电力系统模型

多机电力系统中，各台发电机之间是相互联系和相互影响的。这种相互联系或影响是通过电力网络的联接而得以传递的，因此系统模型必然与网络结构和参数有关。从而描述电力系统的完整数学模型通常由一组动力学方程和一组耦合代数方程所组成。动力学方程组描述了所选定的系统状态量的动力学行为。但其中的耦合变量体现了各发电机之间的相互影响，要用非动力学耦合方程予以补充，它们就是各电压节点和各负荷节点的潮流平衡方程。在稳定控制研究中，最常采用的是经典模型，这时数学模型中仅包含状态方程，而消除了耦合变量，使非动力学耦合方程隐含在动力学方程中。

多机系统中，每个电机的转子摇摆方程为

$$\begin{cases} \delta_i = \omega_i - \omega_n \\ \dot{\omega}_i = \frac{\omega_n}{T_{ji}} (P_{mi} - P_{ei}) - \frac{D_i}{T_{ji}} (\omega_i - \omega_n) \end{cases} \quad (5.8)$$

发电机有功功率和无功功率的表达式分别为

$$\begin{cases} P_{ei} = E_{qi}'^2 G_{ii} + E_{qi}' \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_{qj}' (B_{ij} \sin \delta_{ij} + G_{ij} \cos \delta_{ij}) \\ Q_i = -E_{qi}'^2 B_{ii} + E_{qi}' \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_{qj}' (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (5.9)$$

类似也可得出多机系统中电流 I_{di} ， I_{qi} 表达式为

$$\begin{cases} I_{di} = E_{qi}' B_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_{qj}' (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \\ I_{qi} = E_{qi}' G_{ii} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_{qj}' (B_{ij} \sin \delta_{ij} + G_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (5.10)$$

第 i 台发电机的机端电压方程为

$$V_{Gi} = \sqrt{V_{Gqi}^2 + V_{Gdi}^2} \quad (5.11)$$

V_{Gi} 在 q 和 d 轴上的分量分别为

$$\begin{cases} V_{Gqi} = E'_{qi} - I_{di} X'_{di} \\ V_{Gdi} = I_{qi} X_{qi} \end{cases} \quad (5.12)$$

描述第 i 台发电机转子绕组电磁动态过程方程为

$$\dot{E}'_{qi} = -\frac{1}{T_{d0i}} E_{qi} + \frac{1}{T_{d0i}} (E_{fdi0} + u) \quad (5.13)$$

而且 q 轴暂态电势 E'_{qi} 与 q 轴电势 E_{qi} 之间的关系为

$$E_{qi} = E'_{qi} + I_{di} (X_{di} - X'_{di}) \quad (5.14)$$

代入上式可得第 i 台发电机转子绕组电磁动态过程方程为

$$\dot{E}'_{qi} = -\frac{1}{T_{d0i}} [E'_{qi} + I_{di} (X_{di} - X'_{di})] + \frac{1}{T_{d0i}} (E_{fdi0} + u) \quad (5.15)$$

综上可得具有励磁控制的多机系统数学模型如下^[1,4]

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_n \\ \dot{\omega}_i = \frac{\omega_n}{T_{ji}} (P_{mi} - P_{ei}) - \frac{D_i}{T_{ji}} (\omega_i - \omega_n) \\ \dot{E}'_{qi} = -\frac{1}{T_{d0i}} [E'_{qi} + I_{di} (X_{di} - X'_{di})] + \frac{1}{T_{d0i}} (E_{fdi0} + u_i) \end{cases} \quad (5.16)$$

上述方程中各符号所代表的含义如下

δ_i 为第 i 台发电机转子角(rad); ω_i 为第 i 台发电机转子角速度(p.u.); ω_n 为同步角速度(p.u.); P_{mi} 为第 i 台发电机机械功率(p.u.); P_{ei} 为第 i 台发电机电磁功率(p.u.); T_{ji} 为第 i 台发电机转子惯性时间常数(s); D_i 为第 i 台发电机阻尼系数(p.u.); T_{d0i} 为第 i 台发电机励磁绕组时间常数(s); E'_{qi} 为第 i 台发电机 q 轴电势(p.u.); E_{fdi0} 为系统平衡点处第 i 台发电机励磁电压值(p.u.); u_i 为第 i 台发电机励磁控制量(p.u.); I_{di} 为第 i 台发电机 d 轴定子电流(p.u.); X_{di} 为第 i 台发电机 d 轴定子绕组自感抗(p.u.); X'_{di} 为第 i 台发电机 d 轴定子绕组暂态电抗(p.u.); G_{ij} 为降阶后系统节点导纳矩阵中的转移电导(p.u.); B_{ij} 为降阶后系统节点导纳矩阵中的电纳(p.u.)。

5.3.2 T-S 模糊动态模型

上节针对单机无穷大系统设计了模糊动态最优励磁控制,并对控制的效果作了系统性的比较。存在这样一类电力系统,在这类系统中包括有两个或两个以上在容量上可以比拟的发电厂,经过在电气距离上也是可以比拟的输电线路向某大系统输送电能,在这种情况下,将其完全简化成为单机系统来进行研究误差较大,因而有必要研究关于两机或多机输电系统控制的一系列问题,本文研究的就是这类两机系统的问题,如图 5.5 所示^[60]。

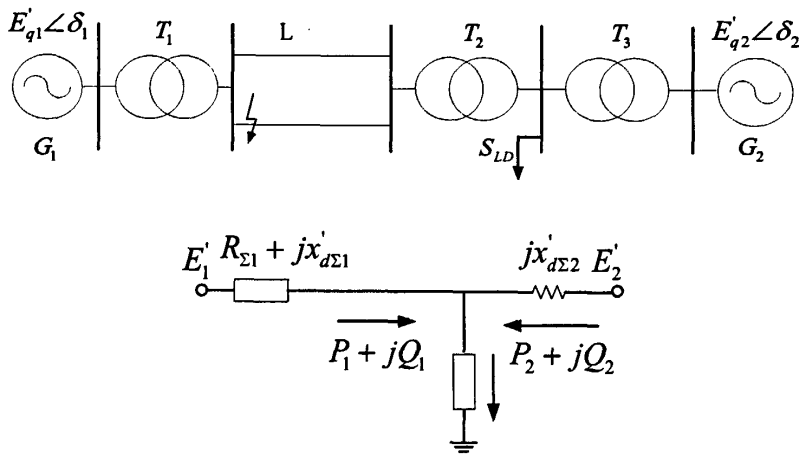


图 5.5 两机系统及其等值电路

主要参数如下, $R_{\Sigma 1} + jX'_{d\Sigma 1} = 0.05 + j0.769$, $jX'_{d\Sigma 2} = j0.141$, $P_{10} + jQ_{10} = 1 + j0.329$, $V_0 = 1.0$, $P_{20} + jQ_{20} = 2 + j0.658$, 负荷采用恒定阻抗模型。

由于电力系统稳定问题本质上具有全局性,因此在电力系统的控制规律中引入广域信息可进一步改善系统的动态性能,提高系统承受大扰动的能力。随着广域测量系统的逐步应用,使得全局信息的获得成为可能,为电力系统全状态控制提供了必要条件。本节正是利用全局信息,基于 T-S 模糊动态模型设计了多机系统多目标励磁控制器。

图 5.5 所示两机电力系统的 T-S 模糊动态模型描述为

Rules:

1. If $(\Delta\delta_1 \text{ is NG})$ and $(\Delta\delta_2 \text{ is NG})$ then $\dot{x} = A_1x + B_1u$
2. If $(\Delta\delta_1 \text{ is NG})$ and $(\Delta\delta_2 \text{ is ZR})$ then $\dot{x} = A_2x + B_2u$
3. If $(\Delta\delta_1 \text{ is NG})$ and $(\Delta\delta_2 \text{ is PO})$ then $\dot{x} = A_3x + B_3u$
4. If $(\Delta\delta_1 \text{ is ZR})$ and $(\Delta\delta_2 \text{ is NG})$ then $\dot{x} = A_4x + B_4u$
5. If $(\Delta\delta_1 \text{ is ZR})$ and $(\Delta\delta_2 \text{ is ZR})$ then $\dot{x} = A_5x + B_5u$

6. If ($\Delta\delta_1$ is ZR) and ($\Delta\delta_2$ is PO) then $\dot{x} = A_6x + B_6u$

7. If ($\Delta\delta_1$ is PO) and ($\Delta\delta_2$ is NG) then $\dot{x} = A_7x + B_7u$

8. If ($\Delta\delta_1$ is PO) and ($\Delta\delta_2$ is ZR) then $\dot{x} = A_8x + B_8u$

9. If ($\Delta\delta_1$ is PO) and ($\Delta\delta_2$ is PO) then $\dot{x} = A_9x + B_9u$

分别求得 $\Delta\delta_1 = \pm 15^\circ, 0^\circ$ 、 $\Delta\delta_2 = \pm 15^\circ, 0^\circ$ 时, 式(5.16)的各平衡点, 在平衡点处线性化可得系统的状态矩阵 A_i 。由式(5.16)可以看出 A_i 决定于功角差 $(\delta_1 - \delta_2)$, 令

$$x = [\delta_1 \quad \delta_2 \quad \omega_1 \quad \omega_2 \quad E'_{q1} \quad E'_{q2}]^T$$

得到

$$\begin{aligned}
 A_1 = A_5 = A_9 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -43.111 & 43.111 & -1 & 0 & -27.469 & -22.0704 \\ 62.232 & -62.232 & 0 & -0.625 & 0.7743 & -140.159 \\ -0.123 & 0.123 & 0 & 0 & 0.117 & 0.188 \\ -0.0075 & 0.0075 & 0 & 0 & 0.2644 & 0.4984 \end{bmatrix} \\
 A_2 = A_6 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -42.356 & 42.356 & -1 & 0 & -18.716 & -7.433 \\ 53.208 & -53.208 & 0 & -0.625 & -13.487 & -199.928 \\ -0.0861 & 0.0861 & 0 & 0 & 0.117 & 0.210 \\ 0.0623 & -0.0623 & 0 & 0 & 0.257 & 0.4984 \end{bmatrix} \\
 A_3 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -43.856 & 43.856 & -1 & 0 & -11.105 & -0.0213 \\ 47.98 & -47.98 & 0 & -0.625 & -17.334 & -149.449 \\ -0.0001 & 0.0001 & 0 & 0 & 0.117 & 0.2171 \\ 0.196 & -0.196 & 0 & 0 & 0.231 & 0.4984 \end{bmatrix} \\
 A_4 = A_8 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -28.482 & 28.482 & -1 & 0 & -33.413 & -23.442 \\ 48.405 & -48.405 & 0 & -0.625 & 12.334 & -140.629 \\ -0.1868 & 0.1868 & 0 & 0 & 0.117 & 0.1535 \\ -0.0828 & 0.0828 & 0 & 0 & 0.2541 & 0.4984 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$A_7 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -17.304 & 17.304 & -1 & 0 & -38.992 & -23.622 \\ 37.083 & -37.083 & 0 & -0.625 & 24.015 & -141.257 \\ -0.239 & 0.239 & 0 & 0 & 0.117 & 0.1085 \\ -0.127 & 0.127 & 0 & 0 & 0.226 & 0.4984 \end{bmatrix}$$

其中 $\Delta\delta_1 = x_1$, $\Delta\delta_2 = x_2$ 为系统状态量的变化, 为模糊规则的前件, 每条规则得适

用度函数如下: $h_i(x(t))$, $i=1,2,\dots,9$, $\sum_{i=1}^9 h_i = 1$

$$h_1(x(t)) = w_{11}(x_1(t))w_{21}(x_2(t));$$

$$h_2(x(t)) = w_{11}(x_1(t))w_{22}(x_2(t));$$

$$h_3(x(t)) = w_{11}(x_1(t))w_{23}(x_2(t));$$

$$h_4(x(t)) = w_{12}(x_1(t))w_{21}(x_2(t));$$

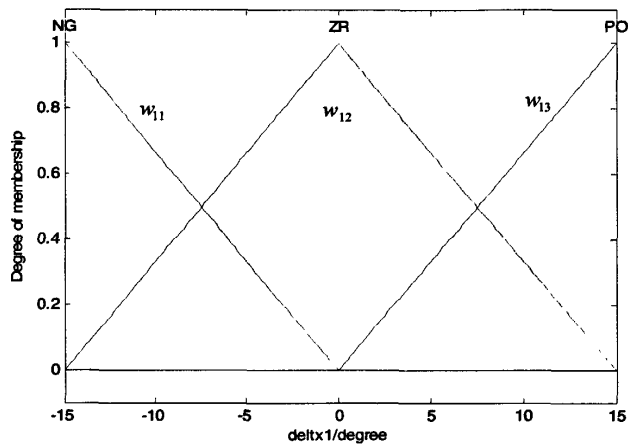
$$h_5(x(t)) = w_{12}(x_1(t))w_{22}(x_2(t));$$

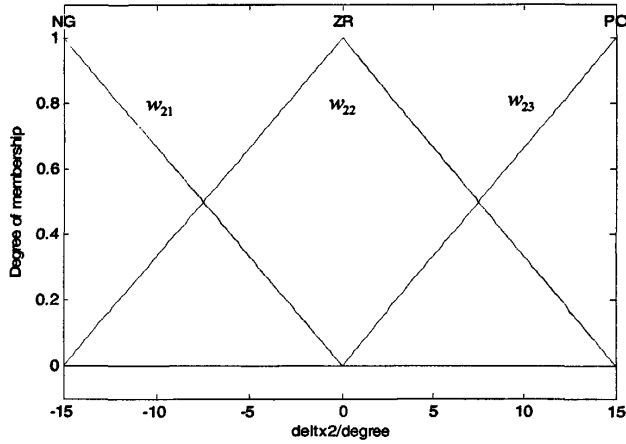
$$h_6(x(t)) = w_{12}(x_1(t))w_{23}(x_2(t));$$

$$h_7(x(t)) = w_{13}(x_1(t))w_{21}(x_2(t));$$

$$h_8(x(t)) = w_{13}(x_1(t))w_{22}(x_2(t));$$

$$h_9(x(t)) = w_{13}(x_1(t))w_{23}(x_2(t))。$$



图 5.6 $\Delta\delta_1, \Delta\delta_2$ 隶属度函数

为了便于计算将 $\Delta\delta_1$ 、 $\Delta\delta_2$ 的单位转化为角度。图 5.6 给出了 $w_{11}, w_{12}, w_{13}, w_{21}, w_{22}, w_{23}$ 的曲线，即 $\Delta\delta_1, \Delta\delta_2$ 的隶属度函数，横轴为功角变化值(单位：度)，纵轴为权值。

5.3.3 控制器设计及数值仿真

以上得到了图 5.5 所示系统的 T-S 模糊模型各子系统，为了简化计算，将得到的系统状态矩阵以 1~5 重新编号，代入式(2.10)，取扰动抑制度 $\gamma=1$ ，极点区域取为 $(-q, r)=(-10, 8)$ ，利用 LMI 工具箱解式(2.10)得

$$Q = \begin{bmatrix} 0.3731 & 0.3920 & -1.2306 & -0.9288 & -0.0446 & 0.0044 \\ 0.3920 & 0.5975 & -1.7870 & -2.9404 & 0.0793 & -0.1496 \\ -1.2306 & -1.7870 & 7.4927 & 7.9198 & 0.4705 & 0.2109 \\ -0.9288 & -2.9404 & 7.9198 & 28.1918 & -1.4305 & 2.2548 \\ -0.0446 & 0.0793 & 0.4705 & -1.4305 & 0.3238 & -0.1731 \\ 0.0044 & -0.1496 & 0.2109 & 2.2548 & -0.1731 & 0.2182 \end{bmatrix}$$

控制律 $K_i = Y_i Q^{-1}$ 依次为

$$K_1 = \begin{bmatrix} -148.1767 & 225.6058 & 25.1931 & 6.7378 & -156.9590 & -24.1868 \\ 55.6292 & -47.6674 & -7.3028 & 13.2192 & 11.9426 & -213.1338 \end{bmatrix};$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} -145.6930 & 222.9144 & 25.0945 & 6.7521 & -137.2142 & 14.7069 \\ 47.6582 & -39.9640 & -7.4112 & 13.1617 & -3.9962 & -269.4446 \end{bmatrix};$$

$$K_3 = \begin{bmatrix} -94.0766 & 169.6375 & 24.6527 & 6.9438 & -180.0665 & -26.7471 \\ 22.7841 & -14.8785 & -7.3080 & 13.2074 & 37.0912 & -213.1588 \end{bmatrix};$$

$$K_4 = \begin{bmatrix} -117.4084 & 194.2759 & 24.9793 & 6.8978 & -169.7938 & -27.5056 \\ 37.3590 & -29.4912 & -7.3483 & 13.2395 & 24.6631 & -212.9824 \end{bmatrix};$$

$$K_5 = \begin{bmatrix} -148.1847 & 225.4515 & 25.0557 & 7.0286 & -122.1967 & 17.0631 \\ 43.2486 & -35.4988 & -7.4240 & 13.2560 & -11.0678 & -232.6831 \end{bmatrix}。$$

其中, K_1 的适用度为 $(h_1 + h_5 + h_9)$, K_2 的适用度为 $(h_2 + h_6)$, K_3 的适用度为 h_3 , K_4 的适用度为 $(h_4 + h_8)$, K_5 的适用度为 h_7 。又因为 $\sum_{i=1}^9 h_i = 1$, 全局系统控制律的构成形式为

$$u(t) = \sum_i^l h_i(x) K_i x(t)。$$

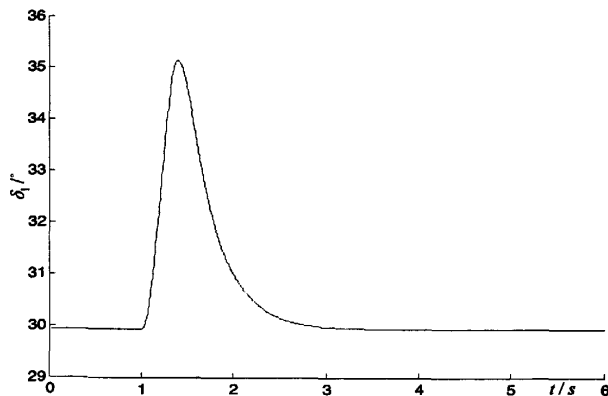
为了验证上述控制律在稳定控制中的作用针对如下几种干扰方式进行仿真, 初始时刻系统处于稳定运行状态。

干扰方式 1, 在 1 秒时, 发电机 G_1 机械功率受到+10%的扰动, 0.3 秒后恢复, 仿真结果由图 5.7 给出;

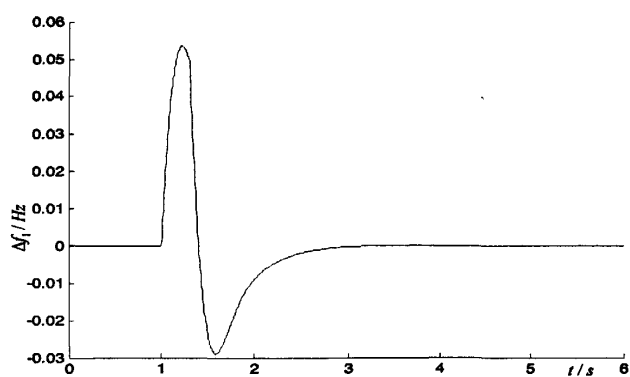
干扰方式 2, 在 $t=1$ 时, 机组 1 的机械功率发生+20%阶跃变化, 且保持为这一新值, 仿真结果见图 5.8;

干扰方式 3, 在 $t=1$ 时, 在靠近发电机 1 的母线处发生可恢复性三相接地短路(瞬时故障), 0.5 秒后故障恢复, 仿真结果见图 5.10。

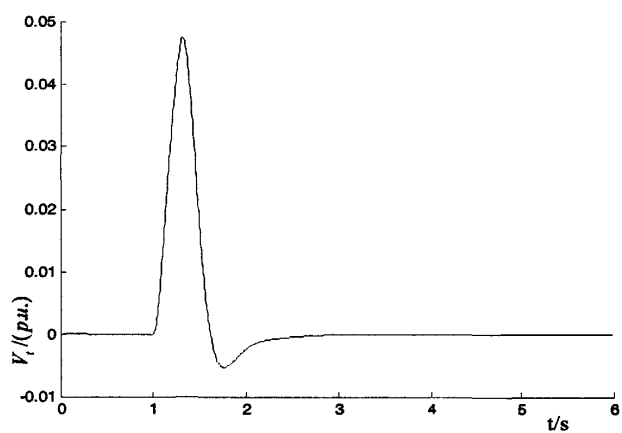
另外, 为了便于比较说明, 文中还设计了线性最优励磁控制, 图中虚线为线性最优励磁控制的效果。



(a) δ_1 响应曲线



(b) 机组 1 频率变化



(c) 发电机 1 机端电压变化

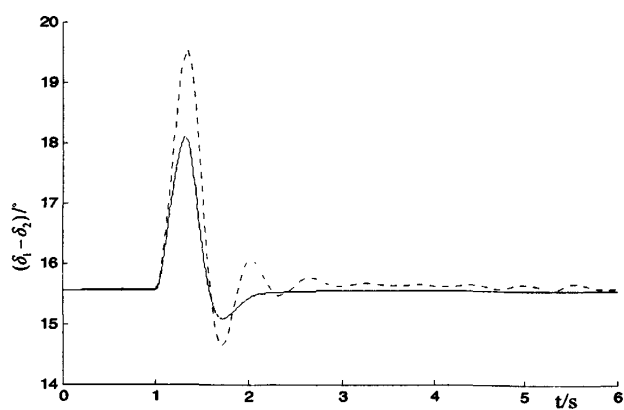
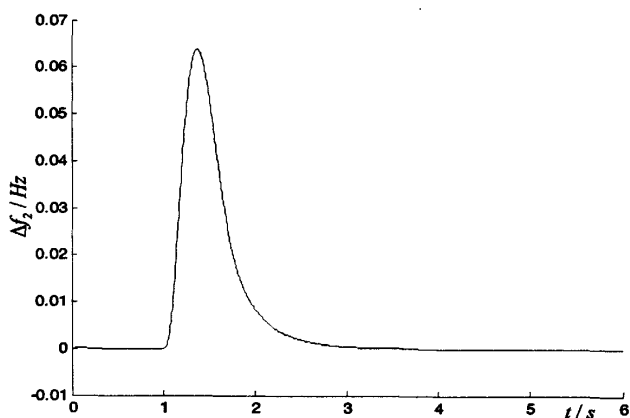
(d) $\delta_1 - \delta_2$ 响应曲线

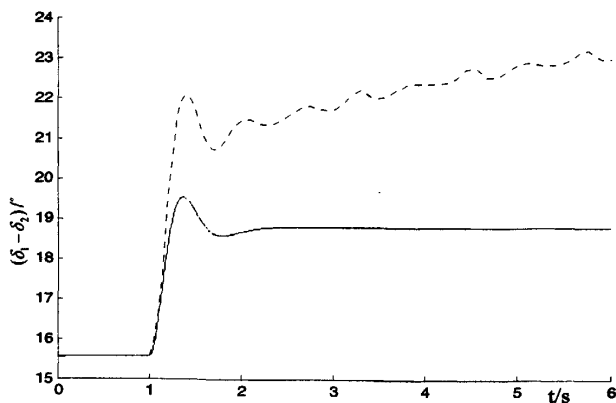
图 5.7 情况 1 系统响应

图 5.7 中, 可以看出系统受到小扰动以后, 系统恢复扰动前的运行状态, 由于系统的运行状态只是在小范围内变化, 最优励磁控制和模糊多目标控制, 都有较好的控制效果。

图 5.8(b)暴露出传统线性最优励磁控制的缺点, 当系统偏离原来平衡点时, 控制器的效果大大减弱, 达不到系统的要求。实线为本文所设计的模糊多目标控制, 从图中可以看出, 系统运行状态变化后, 所设计的控制器能够很好的适应系统的变化, 能够使系统迅速过度到新的平衡状态, 且响应时间短, 超调较小。



(a) 机组 2 频率变化



(b) $\delta_1 - \delta_2$ 响应曲线

图 5.8 机组 1 机械功率阶跃为新值时系统的响应

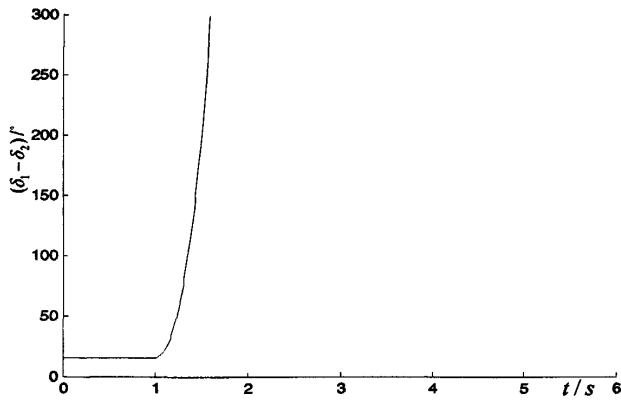
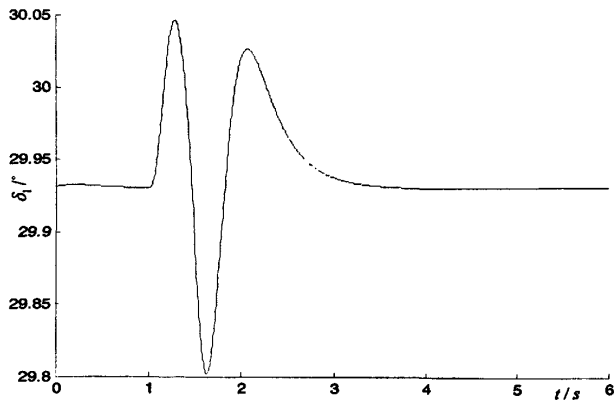


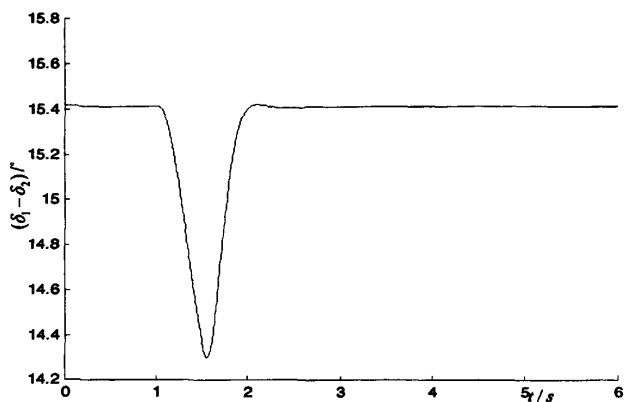
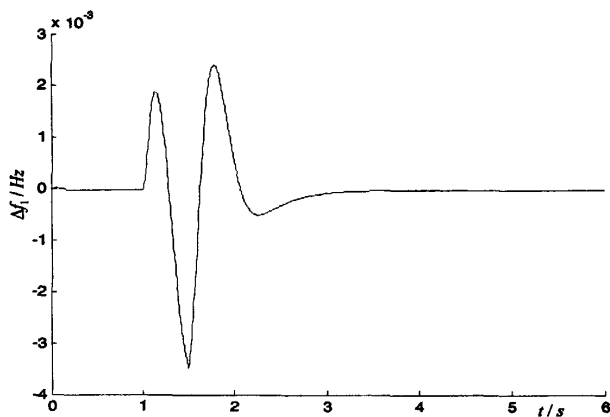
图 5.9 最优励磁控制时相对功角响应

当系统发生短路故障时，系统的运行状态较大地偏离了初始运行状态，也即偏离了设计最优励磁控制器时计算系统状态矩阵的平衡点，出现较大误差，此时，最优励磁控制的效果难以得到保证。图 5.9 给出了干扰方式 3 时，线性最优励磁控制作用下系统的相对功角响应曲线，从图中可以看出系统在发生短路故障后已经失稳，无法达到预期的要求。

从图 5.10 可以看出，在模糊多目标励磁控制器作用下，系统能够较快阻尼振荡，故障恢复后经过大约 2 秒系统即进入稳定运行状态。另一方面，也能够说明模糊多目标励磁控制能够提高系统的稳定裕度。



(a) δ_1 响应曲线

(b) $\delta_1 - \delta_2$ 响应曲线

(c) 机组 1 频率变化

图 5.10 发生三相短路时系统响应曲线

5.4 小结

本章基于 T-S 模糊模型设计了电力系统的励磁控制器。对于单机无穷大电力系统，将传统线性最优励磁控制的固定增益反馈改进为随状态变化的变增益动态非线性反馈。与最优励磁控制的比较可以看出，所设计的模糊最优励磁控制器能够更好适应系统状态变化，提高系统的稳定性。对于一类等效的两区域电力系统，设计了考虑 H_∞ 性能，极点区域约束的多目标控制器，仿真结果表明该控制器能够提高系统的稳定裕度，改善系统的动态品质。

6 结论与展望

本文将 T-S 模糊模型应用于电力系统, 设计了电力系统鲁棒 H_∞ 控制器, 取得了一定的成效。

基于 T-S 模糊模型的主要思想是建立一系列局部动态模型来表示系统在每个局部区域的动态行为, 再利用隶属度函数把这些局部模型连接起来构造一个全局动态模型。整个系统的控制律为各个子系统控制律的非线性动态组合。通过求解一系列线性矩阵不等式来获得系统的控制律, 并将其与其他控制方式进行仿真比较证明方案的有效性和可行性, 得到如下结论:

(1) 针对含周期性负荷扰动的电力系统所设计的模糊 H_∞ 控制器不仅可以抑制周期性负荷扰动对系统的影响, 消除系统的混沌振荡, 而且能够有效地改善系统的静态和暂态稳定性。Matlab 数值仿真结果验证了控制器的有效性和优越性。

(2) 对装设在区域联络线上的可控串联补偿器, 从设计过程中看出该控制器可以保证系统的鲁棒性的同时, 兼顾系统的动态品质, 具有一定的优越性。仿真结果表明考虑极点区域约束的多目标控制器的效果, 与仅考虑 H_∞ 的控制器的性能相比, 具有更好的动态品质, 与基于反馈线性化的非线性 H_∞ 相比, 也能体现出一定的优越性。

(3) 在单机无穷大系统中, 改进的最优励磁控制与传统的最优励磁控制相比, 能够更好地适应系统的运行方式的变化。仿真实例验证了改进控制器的优越性。

(4) 对于一类典型的两区域电力系统, 改变了以往设计控制器时强调分散/局部化的思想。在不及广域测量信号延时的情况下, 设计了一种基于广域全局信息的非线性模糊励磁控制器。所设计的控制器, 既能满足对外界干扰的 H_∞ 性能, 还考虑了极点区域约束。计算机仿真结果表明该新型励磁控制器能够有效阻尼系统振荡, 提高了系统的稳定性, 具有一定的优越性。

综上所述, 将基于 T-S 模型的模糊控制应用于电力系统控制能够使系统很快平息振荡, 有效地提高了系统的静态和暂态稳定, 改善了系统的动态性能。并且, 控制器的构成简单, 能够以线性控制器的形式, 实现非线性控制器的效果。

本文对 T-S 模糊系统应用于电力系统进行了系统的研究, 取得了较好的仿真效果, 但在研究和仿真过程中, 发现还有许多问题和不足之处, 具体有以下几个方面:

(1) 未全面考虑控制量的饱和。在设计励磁控制器时, 没有考虑励磁电压的幅值限制, 特别在暂态过程中励磁电压往往工作在极限状态, 无法实现任意调节。

(2) 本文仅对单机无穷大和两机系统中的励磁控制进行了研究, 而对于更一般情况的多机电力系统由于模糊前件数目较多, 制定模糊规则比较困难, 并且随着规则数的增加, 系统控制律的求取也会更加困难, 这些还需更深入的研究。

(3) 在设计多机电力系统励磁控制器时, 采取全状态反馈的策略, 所需要的控制反馈量既包括本地机组的状态又有远端机组的状态量。而远端机组的信息只能通过广域测量系统获得, 这样所获得的信号必定存在一定的延时, 影响控制器的性能。随着广域测量系统在电力系统的广泛应用, 考虑信号延时的控制策略, 是当前研究的热点之一。

(4) 电力系统 T-S 模糊模型的建立。文中所建立的电力系统 T-S 模型, 只是在经验的基础上, 选取不同工作点建立的, 已经能够取得一定的成效。可见, 如果能够运用合适的理论找到合适的方法更精确地建立电力系统 T-S 模型定能取得更加优越的控制性能。这也是后续工作的一个重点。

针对上述不足, 在接下来的研究工作中需要理清思路, 重点研究多机系统情形, 并将考虑远端机组信息的时滞对系统稳定性的影响。

致 谢

论文完成之际,首先需要感谢我的导师王宝华老师。本文是在王宝华老师的悉心指导下完成的,无论是论文选题还是最后修改定稿,导师自始至终都给予了我悉心的指导,我所取得的每一点成绩和进步都倾注了恩师辛勤的心血。王老师严谨踏实的治学态度,科学的工作方法给了我极大的帮助和影响,我将终生受益。除了学术上的指导,王老师还在生活和工作上给予我无微不至的关怀。在此对王老师两年以来在各方面给我的指导和关心表示衷心的感谢。

我还要衷心感谢 807 教研室的老师们对我学习生活上的帮助。在此谨向吴军基老师、陈劲操老师、杨伟老师、张俊芳老师、都洪基老师、胡文斌老师、李磊老师、郭新红老师、张慧丽老师、李斌老师表示感谢。

感谢 807 教研室的各位同学,与他们的学术探讨和交流,使我在论文和科研工作中获益良多。

感谢在求学道路上曾给予我关心和帮助的同学和朋友们!

最后特别感谢我的家人,是他们在背后默默的关心和支持才让我获得今天的成绩,在此向他们表示我诚挚的感谢。

参考文献

- [1] 卢强,孙元章.电力系统非线性控制[M].北京:科学出版社,1993.
- [2] 王梅义,吴竞昌,蒙定中.大电网系统技术[M].北京:中国电力出版社,1995.
- [3] Yu Y N. Electric power system dynamics[M].Academic press,1983.
- [4] 孙元章,焦晓红,申铁龙.电力系统非线性鲁棒控制[M].北京:清华大学出版社,2007.
- [5] 倪以信,陈寿孙,张宝霖.动态电力系统的理论与分析[M].北京:清华大学出版社,2002.
- [6] P.Kundur.电力系统稳定与控制[M].北京:中国电力出版社,2002.
- [7] Carson W.Taylor. 电力系统电压稳定[M].北京:中国电力出版社,2001.
- [8] K.L. Praprost, K.A. Loparo. A stability theory for constrained dynamic systems with applications to electric power systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control. 1996,41(11):1605~1617.
- [9] 周双喜,朱凌志,郭锡玖,等.电力系统电压稳定性及其控制[M].北京:中国电力出版社,2004.
- [10] K.H.Yasir, DU Dongyun, TANG Yun. Association of SIB points with the non-degenerate equilibria of the extended DAE system[J]. Tsinghua Science and Technology, 2003,18(5):568~572.
- [11] 卢强,王仲鸿,韩英铎.输电系统最优控制[M].北京:科学出版社,1984.
- [12] 韩英铎,王仲鸿,陈淮金.电力系统最优分散协调控制[M].北京:清华大学出版社,1997
- [13] 孙元章,卢强,高景德.多机电力系统非线性励磁控制的研究[J].中国电机工程学报,1989,9(6):16~23.
- [14] Y Wang, D J Hill, R H Middleton. Transient stability enhancement and voltage regulation of power system[J].IEEE Trans on Power System,1993,8(2):620~627.
- [15] 李春文,冯元琨.多变量非线性控制的逆系统方法[M].北京:清华大学出版社,1991.
- [16] 葛友,李春文,孙政顺.逆系统方法在电力系统综合控制中的应用[J].中国电机工程学报.2001,21(4):6~10.
- [17] Li S R, Sun C X, Sun Y Z, et al. Robust excitation controllers design for power systems [J].Control Theory and Applications,1996,13(6):482~488.
- [18] H Cai, Z Qu, D Gan. A Comparison and simulation Study of Nonlinearly Designed Robust Controllers for Power system Transient stability [J] .International Journal of Electrical Power and Energy Systems,2000,22(1):15~28.
- [19] 马进,席在荣,梅生伟,等.基于 Hamilton 能量理论的发电机汽门与励磁非线性稳定控制器的设计[J].中国电机工程学报,2002,22(5):88~93.

- [20] S Mei, T Shen, W Hu, et al. Robust H_{∞} control of a Hamiltonian system with uncertainty and its application to a multi-machine power system[J]. IEE Proc. Control Theory Appl., 2005,152(2):202~210.
- [21] 胡跃明.非线性控制系统理论与应用[M].北京:国防工业出版社,2002.
- [22] 王宝华,杨成梧,张强.发电机的非线性自适应逆推综合控制[J].控制理论与应用,2006,23(1):60~64.
- [23] Ch.Hua, X.Guan, P.Shi. Robust Backstepping Control for a Class of Time Delayed Systems[J]. IEEE Transactions On Automatic Control, 2005 ,50(6): 894~899.
- [24] 于占勋,陈学允.一种新型变结构励磁控制器的设计[J].电力系统自动化,1997,21(10):21~24.
- [25] Liu Wei, Tian Shubao, Yu Yixin, et al. A generator excitation controller based on the hybrid control scheme with feedback linearization and variable structure[J].Journal of Tian University,1998,31 (5) :611~615.
- [26] Zhou X X, Liang J. Nonlinear adaptive control of TCSC to improve the performance of power systems[J]. IEE Proceeding: Generation, Transmission, Distribution, 1999, 146 (3) :310~315.
- [27] 王康,兰洲,甘德强,等.非线性系统自适应控制及其在电力系统中的应用[J].电网技术,2007,31(11):11~16.
- [28] 吴捷,陈巍,刘永强.现代控制技术在电力系统控制中的应用(一、二)[J].中国电机工程学报,1998,18(6):383~387.
- [29] 鞠平,代飞,金宇清,等.电力系统广域测量技术[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [30] 胡志祥,谢小荣,肖晋宇,等.广域测量系统的延迟分析及其测试[J].电力系统自动化,2004,28(15):39~43.
- [31] 罗建裕,王小英,鲁庭瑞,等.基于广域测量技术的电网实时动态监测系统应用[J].电力系统自动化,2003,27(24):78~80.
- [32] 吴忠强.非线性系统的鲁棒控制及应用[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [33] 佟绍成,王涛,王艳平,等.模糊控制系统的设计及稳定性分析[M].北京:科学出版社,2004.
- [34] M.Sugeno, T.Takagi. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control[J].IEEE Transactions on Systems, 1985,15(1):116~132.
- [35] Zhao J, Wertz V, Gorez R. Linear TS Fuzzy Model based Robust Stabilizing Controller Design[A]. Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. 1995: 255~260.
- [36] 孙增圻,张再兴,邓志东.智能控制理论与技术[M].北京:清华大学出版社,1997.

- [37] 王季方,卢正鼎.模糊控制中隶属度函数的确定方法[J].河南科学,2000,18(4): 348~351.
- [38] 楼顺天,胡昌华,张伟.基于 MATLAB 的系统分析与设计——模糊系统[M].西安:西安电子科技大学出版社,2001.
- [39] K.Tanaka, M.Sugeno. Stability Analysis and Design of fuzzy Control System[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1992,45:146~155.
- [40] Hong S K, Langari Reza. An LMI-based H_{∞} fuzzy control system design with TS framework[J]. Information Sciences,2000,74(1/2):163~179.
- [41] 俞立.鲁棒控制——线性矩阵不等式处理方法[M].北京:清华大学出版社,2002.
- [42] 贾英民.鲁棒 H_{∞} 控制[M].北京:科学出版社,2007.
- [43] 郝娟,丁懿,肖定国,等.基于 LMI 的多目标模糊状态反馈控制器设计研究[J].电气应用,2006,25(8):86~90.
- [44] Joo young Park, Jin sung Kim, Dai hee Park. LMI-based design of Stabilizing Fuzzy Controllers for Nonlinear Systems Described by Takagi-Sugeno Fuzzy Model[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2001,122:73~82.
- [45] 贾宏杰,余贻鑫,王成山.电力系统混沌现象及相关研究[J].中国电机工程学报, 2001,21(7):26~30.
- [46] 张伟年,张卫东.一个非线性电力系统的混沌振荡[J].应用数学和力学,1999,20(10): 1094~1100.
- [47] 王宝华.电力系统非线性动力学行为分析与控制[D].南京理工大学,2005.
- [48] 贾宏杰,余贻鑫,王成山.考虑励磁顶值与 PSS 的混沌的分岔现象[J].电力系统自动化,2001,25(1):11~14.
- [49] Tawfik Guesmi, Hsan Hadj Abdallah. Transient Stability Fuzzy Control Approach for Power Systems[J]. IEEE International Conference an Industrial Technology, 2002,1676~1672.
- [50] 谢小荣,姜其荣.柔性交流输电系统的原理与应用[M].北京:清华大学出版社, 2006.
- [51] 武守远,周孝信,李亚健,等.可控串补控制器的物理模型设计与基本特性试验[J].电网技术,1998, 22 (6):21~25.
- [52] 郭强,刘晓鹏,吕世荣等.多机系统可控串联补偿电容(TCSC)非线性控制器[J].电力系统自动化,1998,22(4):24~27.
- [53] 陈菊明,梅生伟,刘锋.多机系统 TCSC 多目标 H_{∞} 控制器设计[J].电力系统自动化,2000,24(21):11~13.
- [54] 王宝华,杨成梧,张强.多机系统 TCSC 逆推鲁棒控制器设计[J].电工技术学报,2005,20(1): 108~112.

- [55] 田杰,尹建华.可控串联补偿(TCSC)的分析研究(上) [J].电力系统自动化,1997,21(10):43~47.
- [56] 王宝华,杨成梧.可控串补电容器非线性 H_∞ 鲁棒控制器的设计[J].电力自动化设备,2000,20(5):28~31.
- [57] 杨超.可控串补(TCSC)控制方法的研究[D].南京理工大学,2005.
- [58] 韩英铎,谢小荣,崔文进.同步发电机励磁控制研究的现状与走向[J].清华大学学报(自然科学版),2001,41(4/5):142~146.
- [59] 李家坤.同步发电机励磁控制方式发展综述[J].电力学报,2005,20(1):26~29.
- [60] 何仰赞,温增银.电力系统分析(下册) 第3版[M].武汉:华中科技大学出版社,2002.
- [61] 孙元章,刘前进.FACTS 控制技术综述——模型、目标与策略[J].电力系统自动化,1999,23(6):1~7.
- [62] 薛定宇,陈阳春.控制数学问题的 MATLAB 求解[M].北京:清华大学出版社,2007.
- [63] 杨洋,张建成.利用 LMI 技术设计多机系统 TCSC 鲁棒控制器[J].电力自动化设备,2007,27(5):105~109.

附 录

攻读硕士学位期间发表的论文情况

- [1] 张勇飞, 王宝华. 基于模糊 T-S 模型的最优励磁控制. 电气应用, 2009, 28(6):60~63.
- [2] 张勇飞, 王宝华, 程少龙. 基于模糊 T-S 模型电力系统 H_∞ 控制. 现代电力, 已录用.
- [3] 张勇飞, 王宝华, 程少龙. 基于模糊 T-S 模型电力系统混沌控制. 全国高校第 24 届电力系统及其自动化专业年会, 2008 年 10 月.
- [4] 程少龙, 王宝华, 张勇飞, 彭鹏. 基于自适应纵联比较原理的广域保护算法研究. 第二十四届全国高等院校电力系统及其自动化专业年会, 2008 年 10 月.
- [5] 程少龙, 王宝华, 张勇飞. 基于自适应纵联比较原理的广域保护研究. 电网与清洁能源, 已录用.