

Nonlinear excitation predictive control of the power system

Abstract

Along with the advancement of society and the development of science, the scale of power system is bigger, several wide range accidents of power system occurred in the past few years. Therefore the subjects of improve and enhance the stability of the power system have received a great deal of attention. Researchers have done much works and got many accomplishments. The paper applies the predictive control theory into the nonlinear excitation control design of the one machine-infinity bus system and the multi-machine power system, and proposes a new nonlinear excitation control law. The main works and the results are follows:

Firstly, the paper gains a new model of the one machine-infinity bus system based on the typical generator model. Combining with project, the state variable of the new model is $[V, P_e, \dot{\omega}]$. Then, the paper brings forward an ameliorative design of the TSE control law. In order to verify the valid of the control law, the paper compares it with the TSE control law and the integral linear optimal control law under the disturbance of machine power.

Based on the typical generator model, the paper also gains a new model of the multi-machine power system with the state variable $[V_n, P_{en}, \dot{\omega}_i]$. Then, three different kinds of the nonlinear excitation control laws are established on the new model. The future information of the state variables is used in the later control laws and lays out the strongpoint. The paper establishes the Andersen system simulate model using MATLAB. The closed-loop control system is set up by the Andersen system simulate model and the nonlinear excitation control law. In order to verify the valid of the control law, the paper experiments the disturbance of machine power and short circuit.

Key words: one machine-infinity bus system; multi-machine power system; nonlinear excitation control; predictive control; Target State Equation (TSE)

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解广西大学有关保留、使用学位论文的规定，即：

广西大学拥有在著作权法规定范围内学位论文的使用权，其中包括：（1）已获学位的研究生必须按学校规定提交学位论文，学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文；（2）为教学和科研目的，学校可以将公开的学位论文作为资料在图书馆、资料室等场所供校内师生阅读，或在校园网上供校内师生浏览部分内容。

本人保证遵守上述规定。

（保密的论文在解密后遵守此规定）

作者签名： 牛方方

导师签名： 李书强

日 期： 2007.6.29

日 期： 2007.6.29

第1章 绪论

1.1 引言

现代电力系统是一个具有统一性、同时性和广域性特点的极端复杂的庞大系统。由于大范围的区域性、全国性以及跨国性的电网互联可以实现资源的优化配置,能够大大提高电网运行的经济性和可靠性,因而成为各国电力系统发展的必然趋势。然而随着大型电力系统互联的发展,确保这样一个系统的稳定安全运行的确是一个非常具有挑战性的问题。近年来一些大范围的电力系统崩溃的事件(如2003年8月14日的美加大停电)时有发生,使国民经济遭受极大损失的同时也给人民生活带来严重危害。因此,电力系统的稳定性越来越受到人们的重视,改善与提高电力系统运行的稳定性迫在眉睫。

一个大规模电力系统要实现稳定运行即可靠供电必须保持完整并能承受各种干扰。系统的设计和运行应使系统能够承受更多可能的故障而不损失负荷(连接到故障元件的负荷除外),能在最不利的可能故障情况下不致产生不可控的、广泛的连锁反应式的停电。因为一旦系统的稳定性遭到破坏,就有可能造成一个或数个大面积停电,使它们一时陷于瘫痪和混乱,严重者甚至危及全国,后果极其严重。

发电机的励磁控制是改善电力系统稳定性有效而经济的措施之一。励磁控制系统的基本功能是维持电压稳定,使发电机端电压保持在允许水平上,进而保证发电机及电力系统设备的安全稳定运行,提高电力系统的稳定性。正因为如此,励磁控制的发展无论是在理论上还是在实际上都引起了人们的高度关注。目前同步发电机励磁控制系统的研究工作主要呈现两种趋势,一是强调研究主励磁系统本身,即励磁方式的改进;另一方面则突出了励磁控制策略的改进。近几十年来,人们对励磁控制规律进行了大量的研究,目的在于充分挖掘励磁系统对提高稳定性地潜力,比如PID+PSS,线性最优励磁控制,自适应励磁控制,智能励磁控制,非线性励磁控制(NEC)等,取得了很多的成果,其中非线性励磁控制因其改善电力系统静态稳定性和暂态稳定性的卓越表现而备受青睐。特别是随着人们对非线性多变量控制方式的探讨不断深入,非线性励磁控制研究硕果累累,出现了基于微分几何法的非线性励磁控制方式,基于大范围直接线性化方

法的非线性励磁控制方式, 基于李雅普诺夫稳定性理论的非线性励磁控制方式, 基于变结构控制方法的非线性励磁控制方式, ……等等。

1.2 励磁控制的发展与现状

近半个世纪以来, 同步发电机励磁控制一直是学术界关注和研究的热点, 励磁控制技术以控制理论为依托也已经取得了可喜的研究成果。几乎所有先进的控制理论, 如线性最优、非线性最优、鲁棒控制、人工智能等, 都被引入到励磁控制的研究中去, 可以说励磁控制技术的每一次突破都是以控制理论的发展为契机的。控制理论及其应用总的提高和发展趋势是由单变量到多变量, 由线性到非线性, 最后成为完全智能化的控制方式, 励磁控制也经历了一条与之完全相适应的发展过程。从40年代至今, 励磁控制方式大体经历了3个阶段, 即基于线性传递函数数学模型的PID控制方式、基于线性状态空间模型的线性最优控制方式、基于反馈线性化的非线性控制方式。

1.2.1 PID控制方式

20世纪30年代到50年代, 古典控制理论发展到了成熟阶段。它主要采用传递函数来描述控制系统, 运用拉氏变换和代数多项式对线性定常系统进行研究。在该理论的指导下, 励磁控制提出了按发电机端电压偏差 ΔV_t 的比例—积分—微分(PID)调节方式, 并运用古典控制理论中频率响应法或根轨迹法来确定传递函数中各个增益的合适参数范围

PID调节方式, 虽然在一定程度上缓和了对单反馈量的励磁调节系统按系统稳定性与按稳态调压精度对调节器放大倍数要求之间的矛盾, 但却不能有效地改善系统的动态品质与提高系统的稳定水平。实践表明, 当PID励磁调节器投入运行后, 会减少系统的阻尼转矩, 即在一定条件下会使系统出现低频振荡。

1.2.2 线性最优控制方式

20世纪60年代末, 现代控制理论的发展和逐渐成熟, 为电力系统多变量控制开拓了新的有效途径。70年代初国际上一些专家提出了基于线性状态空间模型的线性最优励磁控制方式, 简称LOEC(Linear Optimal Excitation Controller), 并成为了将现代控制理论应用于电力系统稳定控制的典型代表。

LOEC是将发电机的多个输出量偏差按最优反馈系数叠加而形成控制量, 它

可以有效改善电力系统的小干扰稳定性,将系统的静稳极限提高至线路的功率传输极限。这种方式弥补了PSS控制方式的不足之处,然而将线性最优控制原理用于多机电力系统励磁控制器的设计时,理论上不能保证最优,也不能保证全局稳定,即得不到分散的最优控制规律,只能得到分散的次优控制方案。

90年代提出了面向多机系统的线性最优励磁控制,并称之为电力系统最优分散协调控制。其主要思想是系统所有发电机只需反馈本地输出量,就可以保证全局稳定且达到二次性能指标为最优。这种方法实现了全系统所有发电机动态行为之间的协调,和以往基于单机无穷大系统设计励磁规律相比,无疑是质的飞跃。但是,这种励磁规律的求取,需要求解高维Levine—Atlans方程组或Riccati方程组,在应用于实际电力系统时,设计计算量繁琐。因此,也只能用于局部或少数机组的分散协调设计。除此之外,线性最优控制规律设计时,如何确定加权矩阵,仍然是一个难题。

总结:PID励磁调节器和LOEC存在一个共同的问题,那就是励磁控制器设计所依据的是电力系统在某一特定状态下近似线性化的数学模型,而电力系统是典型的非线性系统,因此,当电力系统遭受大扰动使实际状态点偏离设计所选的平衡点较远、产生较大幅值的振荡时,按照近似线性化的数学模型设计的励磁控制器,其控制效果将很难令人满意。

1.2.3 非线性控制方式

近年来,非线性控制系统研究方法的逐步建立,促使非线性励磁控制的研究方兴未艾,特别是针对一些特定非线性系统控制问题的研究(如针对仿射非线性系统的微分几何方法)取得了令人瞩目的成就,已得出了非常丰富的分析结果和独特的设计方法,应用较多的非线性励磁控制方式如下:

1.2.3.1 基于微分几何法的非线性励磁控制方式

20世纪90年代,卢强将非线性控制理论应用于电力系统中,基于微分几何理论,采用非线性映射手段,最终得到了多机电力系统非线性励磁控制规律。这种控制规律具有以下显著特点:

第一,控制规律是分散的,即第 i 台发电机励磁控制量 u_i 只与该台发电机本身的输出量:有功功率 P_{ei} 、无功功率 Q_{ei} 、机端电压 V_{ei} 和转速 ω_i 有关,而与其他

机组的状态量或输出量无直接关系。

第二，控制规律独立于输电网络参数，即第 i 台机组的控制量只与本台机组参数：转动惯量 H_i ，转子绕组时间常数 T_{d0i} ， d 轴电抗 x_{di} 及 d 轴暂态电抗 x'_{di} 有关，其中不显含输电网络参数。这就使得按照这种控制规律设计的控制器，对网络参数及网络结构的改变，有完全的适应能力，有完全的鲁棒性。

以上所述非线性控制规律的两大优点，是世界各国电力系统稳定与控制领域的科学与技术工作者们长期以来所期望得到并为之不断探索的。至此，多机电力系统控制决策的分散性和对于网络参数结构变化鲁棒性的问题，得到了圆满的解决。

1.2.3.2 基于大范围直接线性化方法的非线性励磁控制方式

将大范围直接线性化方法应用到非线性励磁控制器的设计中，可以利用线性控制理论直接得到非线性反馈补偿，抵消系统的非线性因素，从而实现了线性化。这种方法的数学过程简明，适合于工程应用，但是该方法仍然是建立在线性化理论基础上的，并要对系统的非线性因素进行严格的验证，将那些在一定条件下对改善系统稳定性起着好作用的非线性因素保留在系统中，即在非线性反馈规律中不予补偿，因此，该设计方法缺乏普遍性。

1.2.3.3 基于李雅普诺夫稳定性理论的非线性励磁控制方式

李雅普诺夫直接法分析电力系统暂态稳定性是近年来研究的热门课题，暂态能量概念的提出更进一步贴近电力系统稳定性分析问题的实质，系统暂态能量函数表明，当电力系统发生故障后，无论故障类型，地点如何，实质上都是在系统中产生了一部分暂态能量，造成了系统功率的不平衡，导致系统振荡甚至瓦解。励磁控制的目的是要尽快地平衡或阻尼掉这部分能量，使系统尽快地恢复到正常稳定运行状态。但是，该方法需要针对具体的求解问题，构造适当的李雅普诺夫函数，而李雅普诺夫函数的构造至今没有找到一般性方法，因此李雅普诺夫方法的应用推广还存在着较大的难度。

1.2.3.4 基于变结构控制方法的非线性励磁控制方式

变结构控制方法由于其滑动模态具有对于干扰和摄动的不变性，从80年代开始逐渐受到人们的关注。变结构最优励磁控制器实现了对不确定动态系统的变

结构控制,目前,应用该方法的难点在于选择各个子控制器的参数和确定开关逻辑,这方面仍然没有较成熟的方法。

随着对励磁控制技术的不断研究探索,智能控制和鲁棒控制的思想精髓也开始用于设计励磁控制器。但是,励磁控制目标的多重性,不同发电机的励磁调节回路之间的耦合性,电力系统的复杂性,使励磁控制至今还是一个具有挑战性的难题,其研究仍然任重而道远。

1.3 预测控制的发展与现状以及在电力系统中的应用

1.3.1 预测控制的发展与现状

预测控制(Predictive Control)的产生,首先是工业实践向控制理论提出的挑战。60年代初形成的现代控制理论,在航天,航空等领域获得了巨大的成就,但是,当人们把该理论应用于工业实践时,却发现这种经典的理论与控制实践之间还存在着巨大的差距。70年代,随着系统辨识、自适应控制、鲁棒控制等理论的进一步发展,预测控制综合各种理论,以计算机技术为平台,如雨后春笋般迅速发展起来,成为控制领域的一朵奇葩!

预测控制技术最初由Richalet和Cutler等人提出,经过20多年的深入研究和发展的,其理论和方法日臻完善,并在工程实际中取得了广泛的应用,其基本原理可以概括为:基于信息处理功能的预测模型、基于有限时域的滚动优化策略和灵活有效的反馈校正机制。

预测控制的基本算法有动态矩阵控制(DMC),模型算法控制(MAC)和广义预测控制(GPC)。

1.3.1.1 动态矩阵控制(DMC)

DMC算法是一种基于对象阶跃响应的预测控制算法,它适用于渐进稳定的线性对象。对于弱非线性对象,可在工作点处首先线性化;对于不稳定对象,可先用常规PID控制使其稳定,然后再使用DMC算法。

1.3.1.2 模型算法控制(MAC)

模型算法控制(MAC)又称模型预测启发控制(MPHC),是Richalet在脉冲响应模型基础上于1979年提出的,与DMC相同,也是适用于渐进稳定的线性对

象。

基于非参数模型的 DMC 和 MAC 具有易于获取模型、算法简单和理论分析相对容易等优点。然而这类算法存在两个致命的弱点：一是预测模型只能表示稳定的被控对象，并且这类模型是通过一定范围内各采样点上的脉冲响应（或阶跃响应）值来表示的，不可避免地存在模型截断误差。二是这类非参数模型不便于在线辨识，不适用于慢时变系统。

1.3.1.3 广义预测控制（GPC）

广义预测控制（GPC）是在自适应控制的环境中发展起来的另一类预测控制算法。以自校正控制技术为基础的不少新算法对数学精度都有一定的要求，例如最小方差自校正调节器对于滞后十分灵敏，如果滞后估计不准或是时变的，控制效果将大打折扣，而极点配置自校正调节器则对系统的阶十分敏感，一旦阶数估计不准，算法将不能使用。克拉克（Clarke）等人在保持最小方差自校正控制的预测模型、最小方差控制、在线辨识等原理的基础上，汲取了 DMC 和 MAC 中的多步预测优化策略，提出了广义预测控制算法。

作为一种自校正控制算法，GPC是针对随机离散系统提出的，不仅提高了预测控制对于不确定性环境的适应能力，而且增强了自适应控制的鲁棒性。

1.3.2 预测控制的特点

预测控制的算法虽然种类繁多，但它们却又共同的方法机理，即包含预测模型、滚动优化、反馈校正三要素，这正是预测控制算法最本质的特征。

（1）预测模型：根据对象的历史信息和未来输入预测未来输出，它可以是参数模型或非参数模型，也就是说，状态方程、传递函数这类传统的模型可以作为预测模型，同样，对于线性稳定对象，阶跃响应、脉冲响应这类非参数模型，也可以作为预测模型使用。

（2）滚动优化：通过某一性能指标的最优来确定未来的控制作用，控制矢量的作用是使预测输出尽量和未来的输出一致。预测控制中的优化与通常的离散最优控制算法有很大的差别，它是不断滚动的局部优化，而非全局最优。因为在每一采样时刻，优化性能指标只涉及到未来有限的时间，而到下一采样时刻，这一优化时段同时向前推移。因此，预测控制在每一时刻有一个相对于该时刻的

优化性能指标,不同时刻优化性能指标的相对形式是相同的,但其绝对形式(即所包含的时间区域)则是不同的。因此,在预测控制中,优化不是一次离线进行,而是反复在线进行的,这种滚动优化策略更加符合过程控制的特点。

(3) 反馈校正:把第一个 u_i 应用于对象,对预测模型进行修正,同时整个过程向后递推一步,然后重新开始预测模型和滚动优化工作。由于实际系统中存在的非线性、时变、模型失配、干扰等因素,基于不变模型的预测不可能和实际情况完全相符,因此,反馈策略是不可少的。滚动优化只有建立在反馈校正的基础上,才能体现出它的优越性。

1.3.3 预测控制在电力系统中的应用

在国际上, V. Rajkumar 以 4 机系统为例将非线性预测控制技术应用到具有柔性交流输电装置的电力系统当中^[9]; Liang Zhi-shan 首次把包含有功功率,角速度和同步发电机机端电压的非线性输出反馈模型应用于多机电力系统^[10]; Chian-Chuang Ding 将电力系统稳定控制器的设计问题概括为理想线性调节器控制问题,并与灰色预测 PID 控制原理相结合应用于 2 机系统,取得了良好的效果^[11]; Lei Qingsheng 把实时预测控制运用到多机电力系统暂态稳定性研究中^[12]; A. Molina 实现了 HVAC 直接负荷控制的多变量预测控制^[13]。

在国内,梁志珊把同步发电机非线性励磁控制与预测控制有机结合起来,在改善功角稳定性,发电机端电压的动态特性方面取得了良好的效果^[30]; 魏刚提出了单元机组负荷多变量模型预测控制,并将其应用于单元机组负荷控制研究^[31]; 李国庆将预测控制应用于电力系统暂态稳定研究,以对发电机的电磁功率的实时测量来预测系统的稳定性^[32]; 侯国莲采用基于阶跃响应模型的多输入多输出系统的预测函数控制算法实现火电厂单元机组的协调控制^[33]; 王国良进行了广义预测在永磁同步电动机控制中的应用研究^[34]; 胡兆庆将灰色预测引入发电机励磁控制系统,在对发电机状态量进行预测的基础上,对发电机励磁控制系统进行预测控制^[35]。

1.4 课题的选题背景

由于电力系统运行稳定性的破坏事故,会造成大面积停电,使国民经济遭受重大损失,给人民生活带来重大影响,因此,改善与提高电力系统运行的稳定性

意义重大。早在20世纪40年代,有电力系统专家就强调指出了同步发电机励磁的调节对提高电力系统稳定性的重要作用。

励磁控制问题是一个典型的非线性控制问题,原因在于电力系统具有高度的非线性特性。当系统的运行点改变时,系统的动态特性会显著改变,此时,单一变量的控制方式和线性控制器就难以满足电力系统稳定的要求,只有非线性控制方式的控制器才能有效地提高电力系统稳定能力。因此非线性励磁控制方式的采用是励磁控制方式发展的必然趋势。

励磁控制的研究重点应放在提高系统参数的鲁棒性和在不精确模型下提高励磁控制效果,而预测控制算法对模型的精度要求低,具有兼顾被控对象的非线性、时变性及干扰影响的特点。

预测控制算法是一种新型计算机优化控制方法,它汲取了现代控制理论中的优化思想,用不断的在线有限优化,即滚动优化,取代传统的最优控制。由于在优化过程中利用实测信息不断进行反馈校正,所以能在一定程度上克服由于预测模型误差和某些不确定性干扰等的影响,增强系统的鲁棒性,解决了具有非线性、不确定性和时变性特点的复杂系统建模困难的难题。本课题针对电力系统非线性的本质,运用预测控制理论的基本原理和方法,对多台发电机组进行非线性预测励磁控制设计,即以发电机为控制对象,融入预测控制的思想精髓,解决多机系统控制中出现的问题,以改善系统的稳定性,提高电网的稳定运行能力。

1.5 本文的工作

本文基于电力系统非线性的本质,运用预测控制理论的基本原理和方法,对电力系统进行非线性预测励磁控制设计,具体工作如下:

对于单机无穷大系统,在基于目标状态方程(TSE)的非线性励磁控制设计的基础上提出了一种改进设计方法,并将该控制规律与基于TSE的控制规律、线性最优控制规律进行了仿真比较考察。

本文的重点工作在于多机系统非线性励磁控制的设计。首先是要建立多机系统励磁控制的数学模型。多机系统数学模型的建立是本论文中的第一个难点,也是后续研究工作顺利开展的前提。该模型与单机一无穷大系统的数学模型相

比具有本质的区别,怎样用数学模型去描述各台发电机之间的相互关联和影响是建模的关键和难点,另外,状态变量的恰当选取也是建模过程中需要考虑的问题。

其次是设计基于预测控制原理的非线性励磁控制规律。本文提出了以状态变量与它们轨迹之间偏差的微分为目标状态方程的(Target State Equation)的非线性励磁预测控制规律。定义目标状态方程的目的在于加快输出变量的跟踪速度,换句话说就是加强控制变量对输出变量的控制作用。该控制规律在消除输出变量的稳态误差和提高系统的动态特性方面效果显著。

第三是在 MATLAB 环境中建立安德森 3 机 9 节点系统的 Simulink 仿真模型,并与设计的励磁控制器构成了闭环控制系统。离线仿真是本论文中的第二个难点,就是要求运用前面建好的多机电力系统的数学模型结合安德森 3 机系统的具体参数来建立 Simulink 仿真模型。

该模型由发电机,网络方程和控制规律三个部分构成。其中,发电机部分主要描述的是经典的发电机 3 阶模型,建立多机电力系统的数学模型的目的就体现在此。网络方程部分是多机系统 Simulink 仿真模型的核心,因为多机系统中各台发电机之间的相互关联和影响正是通过网络方程来实现的。网络方程采用何种表达方式直接决定了该系统模型的繁简程度,而如何选取网络方程的变量则直接决定了建立该模型的难易程度,因此,在网络方程问题的处理上值得仔细推敲。控制规律是本论文研究的关键技术,离线仿真的效果是否理想直接取决于控制规律是否成功,设计出理想的控制规律来达到良好离线仿真的效果正是本课题所追求的最终目标。

最后,本文验证了所设计的多机系统控制规律在机械功率扰动和 3 相短路仿真中的控制效果。

第2章 预测控制理论

2.1 预测控制的理论基础

预测控制是70年代后期产生的一类新型计算机控制算法，它的问世是来自复杂工业实践向高层优化控制提出的挑战。20多年来，随着它处理复杂系统控制的策略思想日益为人们所认识，以及它在工业实践中大量成功的应用，这一控制技术的生命力及诱人的应用前景已引起了控制理论界和工业控制界的广泛兴趣。研究表明它对于非线性问题的解决有无可比拟的优越性。

就一般的意义来说，预测控制不论其算法形式如何不同，都应建立在下述三项基本原理基础上。

2.1.1 模型预测

预测控制是一种基于模型的控制算法，这一模型称为预测模型，预测模型的功能是根据对象的历史信息和未来输入预测其未来输出，这里只强调模型的功能而不强调其结构形式，因此，传递函数，状态方程，这类传统的模型都可以作为预测模型，对于线性稳定对象，甚至阶跃响应，脉冲响应这类非参数模型，也可以直接作为预测模型使用。此外，非线性系统，分布参数系统的模型，只要具备上述功能，也可以在对这类系统进行预测控制时作为预测模型使用。

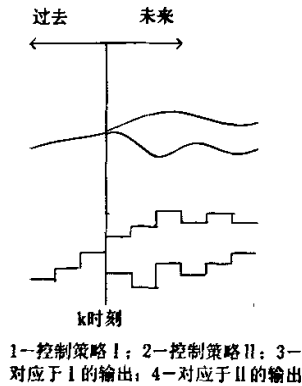


图2-1 基于模型的预测

Fig.2-1 Predictive model

预测模型具有展示系统未来动态行为的功能, 这样, 我们就可像在系统仿真时那样, 任意地给出未来的控制策略, 观察对象在不同控制策略下的输出变化(如图2-1, 图中 u 为控制量, y 为输出量)。从而为比较这些控制策略的优劣提供了基础。

2.1.2 滚动优化

预测控制是一种优化控制算法, 它是通过某一性能指标的最优来确定未来的控制作用的。这一性能指标涉及到系统未来的行为, 例如, 通常可取对象输出在未来的采样点上跟踪某一期望轨迹的方差为最小; 但也可取更广泛的形式, 例如要求控制能量为最小而同时保持输出在一定范围内等等。性能指标中涉及到的系统未来的行为, 是根据预测模型由未来的控制策略决定的。

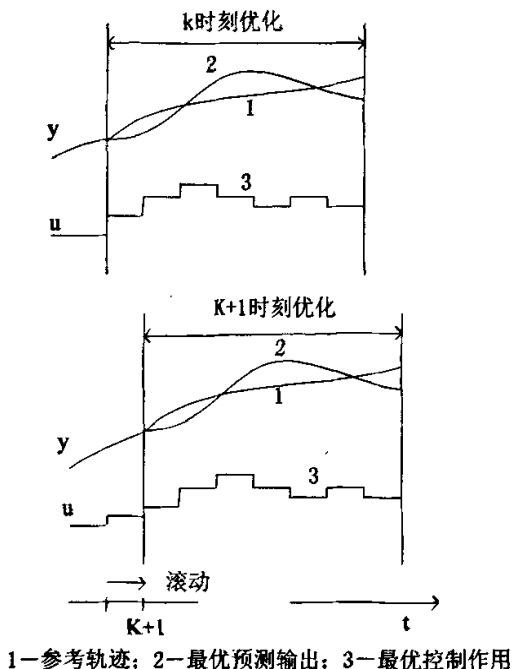


图2-2 滚动优化

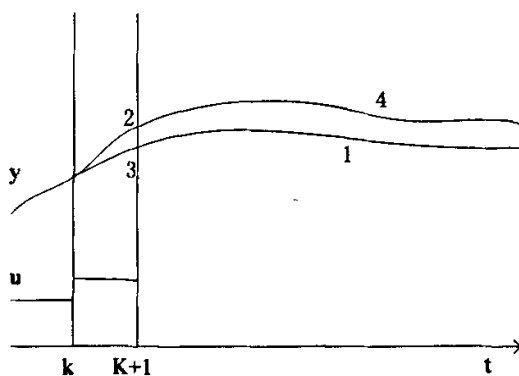
Fig.2-2 Rolling optimize

然而, 预测控制中的优化与传统意义下的离散最优控制有很大的差别。这表现在预测控制中的优化是一种有限时段的滚动优化。在每一个采样时刻, 优

化性能指标只涉及到从该时刻起未来有限的时间,而到下一采样时刻,这一优化时段同时向前推移(见图2-2)。因此,预测控制不是用一个对全局相同的优化性能指标,而是在每一时刻有一个相对于该时刻的优化性能指标。不同时刻优化性能指标的相对形式是相同的,但其绝对形式,即包括的时间区域,则是不同的。因此,在预测控制中,优化不是一次离线进行,而是反复在线进行的,这就是滚动优化的含义,也是预测控制区别于传统最优控制的根本点。

2.1.3 反馈校正

预测控制是一种闭环控制算法。在通过优化确定了一系列未来的控制作用后,为了防止模型失配或环境干扰引起控制对理想状态的偏离,预测控制通常不是把这些控制作用逐一全部实施,而只是实现本时刻的控制作用,到下一采样时刻,则首先检测对象的实际输出,并利用这一实时信息对基于模型的预测进行修正,然后再进行新的优化(见图2-3)。



1— k 时刻的预测输出; 2— $k+1$ 时刻的预测输出;
3—预测误差; 4— $k+1$ 时刻校正后的预测输出。

图2-3 误差校正

Fig.2-3 Error emendation

反馈校正的形式是多样的,可以在保持预测模型不变的基础上,对未来的误差做出预测并加以补偿,也可以根据在线辨识的原理直接修改预测模型。不论取何种校正形式,预测控制都把优化建立在系统实际的基础上,并力图在优化时对系统未来的动态行为做出较准确的预测。因此,预测控制中的优化不仅基于模型,而且利用了反馈信息,因而构成了闭环优化。

综上所述可以看到,预测控制作为一种新型计算机控制算法,是有其鲜明特征的,它是一种基于模型、滚动实施并结合反馈校正的优化控制算法,因此我们不难看出预测控制在处理复杂工业对象具有无可比拟优越性。首先,对于复杂的工业对象,由于辨识其最小化模型要花费很大的代价,往往给基于传递函数或状态方程的控制算法带来困难。而预测控制所需要的模型只强调其预测功能,不苛求其结构形式,从而为系统建模带来了方便。在许多场合下,我们只测定对象的阶跃响应或脉冲响应,便可直接得到预测模型,而不必进一步导出其传递函数或其状态方程,这对工业应用无疑是有巨大的吸引力的。更重要的是,预测控制汲取了优化控制的思想,但利用滚动的有限时段优化取代了一成不变的全局优化。这虽然在理想情况下不能取得全局最优,但由于实际上不可避免地存在着模型误差和环境干扰,这种建立在实际反馈信息基础上的反复优化,能不断顾及不确定性的影响并及时加以校正,反而要比只依靠模型的一次优化更能适应实际过程,有更强的鲁棒性。所以,预测控制是针对传统最优控制在工业过程中的不适用性而进行修正的一种新型优化控制算法。

到目前为止,预测控制理论无论是在理论研究方面还是在具体工程应用方面,都已经有很多学者在这方面做了许多有价值的研究工作。

2.2 几个重要概念

2.2.1 仿射非线性系统

本节将着重介绍仿射非线性系统的概念。

对于一个控制系统来说,如果它的数学模型具有如下形式,

状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1, \dots, x_n) + g_{11}(x_1, \dots, x_n)u_1 + \dots + g_{m1}(x_1, \dots, x_n)u_m \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, \dots, x_n) + g_{12}(x_1, \dots, x_n)u_1 + \dots + g_{m2}(x_1, \dots, x_n)u_m \\ \dots \\ \dot{x}_n = f_n(x_1, \dots, x_n) + g_{1n}(x_1, \dots, x_n)u_1 + \dots + g_{mn}(x_1, \dots, x_n)u_m \end{cases} \quad (2.1)$$

输出方程为:

$$\begin{cases} y_1 = h_1(x_1, \dots, x_n) \\ \dots\dots\dots \\ y_m = h_m(x_1, \dots, x_n) \end{cases} \quad (2.2)$$

将上式写成压缩形式则为

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = f(X(t)) + \sum_{i=1}^m g_i(X(t))u_i(t) \\ Y(t) = h(t) \end{cases} \quad (2.3)$$

其中, $X \in R^n$ 为状态向量, $u_i (i=1, \dots, m)$ 为控制量, $f(X)$ 与 $g_i(X) (i=1, \dots, m)$ 为 n 维函数向量; $h(X)$ 为 m 维输出函数向量。

那么, 该系统就称为是仿射非线性系统, 其具有的显著特征为: 状态向量的微分与状态量 $X(t)$ 的关系是非线性的, 而控制量 $u_i (i=1, \dots, m)$ 的关系却是线性的。本论文所研究的对象——多机电力系统正是这种类型的系统。

2.2.2 李导数

现在让我们给出李导数的确切定义, 它将是我们的研究非线性控制系统问题的有利工具。

定义 2.1 给定一个 $X = [x_1, \dots, x_n]^T$ 的标量函数 $\lambda(X)$ 与一个向量场 $f(X) = [f_1, \dots, f_n]^T$, 以 $L_f \lambda(X)$ 表示的用下列运算

$$L_f \lambda(X) = \frac{\partial \lambda(X)}{\partial X} f(X) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \lambda(X)}{\partial x_i} f_i(X) \quad (2.4)$$

所得出的新标量函数定义为函数 $\lambda(X)$ 沿向量场 $f(X)$ 的导数称李导数。

由上述定义可知, 李导数是一个标量函数, 因此它与原来的标量函数 $\lambda(X)$ 一样, 可以再一次对另一向量场 $g(X)$ 做李导数, 即

$$L_g L_f \lambda(X) = \frac{\partial (L_f \lambda(X))}{\partial X} g(X) \quad (2.5)$$

当然, $\lambda(X)$ 对 $f(X)$ 的一阶李导数 $L_f \lambda(X)$ 也可再次对 $f(X)$ 做李导数, 以此类推直至 k 阶李导数, 即

$$\begin{aligned}
L_f(L_f\lambda(X)) &= L_f^2\lambda(X) = \frac{\partial(L_f\lambda(X))}{\partial X} f(X) \\
&\dots\dots\dots \\
L_f^k\lambda(X) &= \frac{\partial(L_f^{k-1}\lambda(X))}{\partial X} f(X)
\end{aligned} \tag{2.6}$$

上式中的 $\lambda(X)$ 对向量场 $f(X)$ 的 k 阶李导数 $L_f^k\lambda(X)$ 仍然式一个标量函数, 因此它还可以对另一向量场 $g(X)$ 再做李导数, 即

$$L_g L_f^k \lambda(X) = \frac{\partial(L_f^{k-1}\lambda(X))}{\partial X} g(X) \tag{2.7}$$

2.2.3 控制系统的二次性能指标

控制是用施加某种特定输入的方法, 改造所涉及的各种动力学系统的性能, 使其最大限度地满足特定需要的理论与技术的总称。设计一个控制系统的目的就是要使系统体现出设计者想要实现的某些功能或者使系统的性能达到某些要求。在我们设计某个控制系统的控制器时, 通常要先根据工程上的各种要求提出不同的性能指标, 然后根据所提出的性能指标进行设计, 求解控制规律并设置控制器的参数。也就是说, 一个控制系统的性能指标和控制规律会随着控制要求与控制目的的不同而不同。因此对一个控制系统提出什么样的性能指标, 直接决定了控制系统的控制效果是否理想。控制系统设计是指寻找控制规律的整个过程, 它包括建立数学模型, 对控制系统提出要求, 求出满足要求的控制规律这三个步骤。

在控制规律的设计过程中, 我们的主要目的应该是针对工程实际所关心的量, 寻找某种控制规律使得它们的性能为最优。当然, 这些变量可能是系统的状态变量, 也可能不是系统的状态变量, 还可能是状态量与非状态量的集合。在电力系统中, 这种最优的概念可体现为: 超调量很小, 收敛非常快和振荡少。因此, 无论是线性设计, 还是非线性设计, 我们的设计应该是以这些量为目标, 让它们具有非常好的动、静态性能。

这种要求可以用不同形式的数学语言来描述, 二次型就是其中一种。

$$J = \int_0^\infty [\xi(t) - y(t)]^2 dt = J_{\min} \tag{2.8}$$

式中: $\xi(t)$ 是理想的动态响应, $y(t)$ 是实际的动态响应。

二次型性能指标即误差函数的平方对时间的定积分, 因为可以充分体现实际动态响应与理想动态响应之间的误差最小要求, 而且物理意义明确, 故而在控制器设计中经常用到。

对于励磁控制来说, 在理想情况下, 我们希望当实际系统受到干扰时, 输出量能够不经过任何振荡和时滞地回到输出量的期望值。实际上, 由于系统的惯性, 理想情况是不可能实现的, 但是, 我们可以追求实际的动态响应与理想的动态响应之间的误差尽可能的小。

当我们设计电力系统的非线性励磁控制器时, 我们需要对励磁电压这个控制量进行一定的限制, 要求二次型性能指标在满足平方误差函数定积分极小值的同时也使得控制量的正定二次型函数的积分达到极小值, 即

$$J = \int_0^{\infty} \{ [\Xi(t) - X(t)]^T Q [\Xi(t) - X(t)] + U^T(t) R U(t) \} dt = J_{\min} \quad (2.9)$$

上式中, R 是 $r \times r$ 阶的实对称正定矩阵, r 为控制向量 U 的维数。对上述二次性能指标 J 取极值即求解方程 $\frac{\partial J}{\partial U(t)} = 0$ 将得到控制系统的最优控制规律。

在进行非线性预测控制设计时, 假设非线性模型有如下离散形式:

$$Y(k+1) = F(Y(k), U(k)) \quad (2.10)$$

式中:

$Y(k+1)$ 是 $k+1$ 时刻 n 维输出向量

$Y(k)$ 是 k 时刻 n 维输出向量

$U(k)$ 是 k 时刻 m 维输出向量

那么, 控制系统的最优控制规律可以由如下二次性能指标确定:

$$J = [Y(k+1) - Y_r(k+1)]^T Q [Y(k+1) - Y_r(k+1)] + [U(k) - U^*]^T R [U(k) - U^*] \quad (2.11)$$

式中:

$Q \in R^{n \times n}$ 是半正定的,

$R \in R^{m \times m}$ 是正定的,

$Y_r(k+1)$ 是 $k+1$ 时刻 n 维参考输入向量,

U^* 是控制量的参考值,

对上述二次性能指标 J 取极值即求解方程 $\frac{\partial J}{\partial U(k)} = 0$, 将得到控制系统的最

优控制规律。

尤为值得关注的是多机系统二次性能指标的选择问题。在设计能使多机电力系统各控制器相互协调的非线性励磁控制器的过程中, 很重要的一点是建立一个全系统统一的性能指标, 每台发电机的励磁控制器在实现其基本功能的同时, 以这个总的指标作为共同努力的方向, 并在这个共同的目标下达到协调。

在电力系统运行过程中, 人们对其性能指标的要求是多方面的, 主要体现在以下几个方面: 1、电压质量满足一定要求; 2、频率质量满足一定要求; 3、运行的可靠性; 4、具有较好的静态稳定性; 5、具有较好的动态响应特性; 6、具有较好的暂态稳定性; 7、运行的经济性。这些指标在电力系统运行过程中都是很重要的, 但并不意味着所有这些指标都必须包括在各控制器的性能指标内。例如, 其中有些指标可以通过装设在调频厂的调频装置的调节维持在精确范围内; 还有一些指标是通过系统调度命令, 而不是通过各控制器的控制规律来实现的, 如系统的经济运行、系统的安全可靠性等。上述几种指标可以不包括在各控制器的性能指标之内, 因此, 我们对只对包含在各控制器的性能指标内的电力系统性能指标进行讨论。

电压稳定性与静态稳定性的关系

在系统阻尼足够大、不发生低频振荡的条件下, 发电机励磁调节器的电压放大倍数越高, 机端电压越稳定, 发电机运行在稳态情况下所能输送的功率越高。因此, 可以说电压稳定性与静态稳定性是一致的。

电压稳定性与动态稳定性之间的关系

电压稳定性与系统的动态响应特性是密切相关的。近三十年来的大量理论

研究工作和工作实践表明,当发电机励磁调节系统电压反馈放大倍数较高时,特别在采用快速励磁系统情况下,如不采取有效措施,系统机电振荡模式的阻尼会严重恶化,甚至出现负阻尼,产生自发的低频振荡。只有采取措施,增强系统的阻尼,才有可能在电压放大倍数较高时不发生低频振荡,从而使系统电压稳定性有较大幅度的提高。因此,改善系统的动态特性是保证系统电压稳定的前提。

系统的动态稳定性对系统的暂态稳定性的影响

如果系统的动态稳定性很好、阻尼较强,在系统发生大干扰后,振荡就会很快平息,从这个意义上说,良好的动态响应特性有助于系统暂态稳定性的提高。

动态响应指标与提高静态稳定和暂态稳定性是相关的,好的动态特性即好的阻尼特性有利于改善静态稳定极限和暂态稳定极限,加之动态响应指标易于解析化并且便于非线性最优化处理,而静态稳定指标和暂态稳定指标或静态和暂态稳定域则很难用解析表达式描述,特别是在多机电力系统中更是如此。因此,我们在考虑系统的性能指标时首先采用动态响应指标来进行系统设计,在此基础上兼顾其它指标的要求。

显然,在电力系统中机组的动态响应好并不等于静态稳定极限最高或在某一运行点的静态稳定储备最高,也不等于暂态稳定极限最高。不同的系统对这三者可能有不同的侧重,这可以通过调整反馈信号的权来进一步协调。

2.3 仿射非线性系统的预测控制规律

考虑非线性系统形式

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= f_1(x) + d_1(t) \\ \dot{x}_2 &= f_2(x) + g_2(x)u + d_1(t) \\ y &= c(x) + d_3(t)\end{aligned}\tag{2.12}$$

其中 $x_1(t) \in R^{n_1}, x_2(t) \in R^{n_2}, n_1 + n_2 = n, x(t) = [x_1^T(t), x_2^T(t)]^T \in X \subset R^n$ 是动态向量。 $u(t) \in U \subset R^m$ 代表控制量。这里我们假定 $m \leq n$, 因为大部分物理系统都是这种情况。 $f_1: R^n \rightarrow R^{n_1}, C: R^n \rightarrow R^m$ 是充分可微的, $f_2: R^n \rightarrow R^{n_2}$ 和 $g_2: R^n \rightarrow R^{n_2 \times m}$ 只要求 C^1 。 $d_1(t), d_2(t), d_3(t)$ 通常是不可预测的随机扰动, 在以下的多机电力系

统的研究中, 由于发电机的参数和模型相对来说是确切可知的, 在控制规律的推导过程中不予考虑。

假设在 $0 \leq t \leq t_f$ 规定 $q(t)$ 为期望响应, 由所研究问题来决定。 $q(t)$ 既可以是状态量 $X(t)$ 的期望响应(这样 $q(t) \in R^n$), 也可以是输出 $y(t)$ 的期望响应(那么 $q(t) \in R^m$) 的参考轨迹。

在本论文的研究中, 我们选择 $q(t)$ 是状态量 $X(t)$ 的期望响应的情况, 并做下面的假设。

假设 2.1 当 $q(t)$ 是状态量 $X(t)$ 的允许参考轨迹时, $q(t) \in X$, 对于所有的 $t \in [0, t_f]$ 存在有界参考控制 $u^*(t) \in U$ 。其中 $q(t) = [q_1^T(t), q_2^T(t)]^T$ 。

这个假设保证 $q(t)$ 能够由系统利用一些允许输入获得。注意到, $u^*(t)$ 并不要求确切的知道, 控制器设计问题就是找到反馈控制规律 $u = u(x, t)$ 。对于所有的时间 $0 \leq t \leq t_f$, $u(t) \in U$, 对于任意初始条件 $x(0) \in x_0 \subset X$, 保证系统响应(状态或输出)逼近 $q(t)$ 。

定义 2.5 在上式所描述的系统中, $x_i(t)$ 是状态变量 $x(t)$ 的第 i 个分量, 对 x_i 求导数, 一直求到含有 $u(t)$ 的状态变量出现为止时对应的最低阶导数叫变量 x_i 的预测阶, 用 r_i 表示, 其中 $i = 1, 2, \dots, n$ 。

我们将首先考虑 $q(t)$ 表示期望的状态响应的情况, 给定任意时刻 $t \in [0, t_f]$ 的系统状态 $x(t)$, 当前控制 $u(t)$ 确定未来的状态响应趋势。然而, $u(t)$ 影响 $x(t)$ 的每一个成分的程度是不同的。对控制的整个系统响应能够由复杂的函数展开来表示。在这个研究中, 我们使用简单有效的函数展开, 让 r_i , $i = 1, 2, \dots, n$ 是 $x_i(t)$ 导数的预测阶。

为了完全表示 $u(t)$ 对 $x_i(t + \Delta t)$ 的影响, 对于一个小的 $\Delta t > 0$, 我们利用时间 t 处的第 r_i 阶 Taylor 级数逼近每个 $x_i(t + \Delta t)$, 这样, 我们能够以简洁的方式把 $x(t + \Delta t)$ 表示为 $u(t)$ 的向量函数。

$$x(t + \Delta t) \approx x(t) + v(x(t), \Delta t) + A(\Delta t)w(x(t))u(t) \quad (2.13)$$

其中 $v(x(t), \Delta t) = [v_1(x(t), \Delta t), \dots, v_n(x(t), \Delta t)]^T$, 有

$$v_i = \Delta t L_f^0(f_i) + \frac{\Delta t^2}{2!} L_f^1(f_i) + \cdots + \frac{\Delta t^n}{n!} L_f^{n-1}(f_i) \quad i=1,2,\dots,n \quad (2.14)$$

其中 $\Delta t > 0$ 是正实数。 $L_f^k(f_i)$ 表示相对于 f 的 f_i 的 k 阶李导数。 f_i 是 f 的第 i 个元素。

$$L_f^0(f_i) = f_i, L_f^1(f_i) = \frac{\partial f_i}{\partial x} f, L_f^2(f_i) = \frac{\partial L_f^1(f_i)}{\partial x} f \quad (2.15)$$

其中 $\Lambda(\Delta t) \in R^{n \times n}$ 是对角矩阵：且主对角线上的元素是

$$\lambda_{ii}(\Delta t) = \frac{\Delta t^n}{n!} \quad i=1,2,\dots,n$$

$w(x) \in R^{n \times m}$ 的每一行是以下列形式给出的

$$w_i = [L_{g_i}(L_{f_i}^{-1}(X_i)), \dots, L_{g_m}(L_{f_i}^{-1}(X_i))] \quad i=1,2,\dots,n$$

其中，相对于 g_i 的李导数类似地可以被定义为：

$$L_{g_i}(L_{f_i}^{-1}(X_i)) = \frac{\partial L_{f_i}^{-1}(X_i)}{\partial X} g_i \quad i=1,2,\dots,n$$

同理，我们可以用第 i 阶 Taylor 级数展开 $q(t + \Delta t)$ ，有

$$q(t + \Delta t) \approx q(t) + d(t, \Delta t)$$

其中 $d(t, \Delta t) \in R^n$ 的第 i 个分量是：

$$d_i(t, \Delta t) = \Delta t \dot{q}_i(t) + \frac{\Delta t^2}{2!} \ddot{q}_i(t) + \cdots + \frac{\Delta t^n}{n!} q_i^{(n)}(t) \quad i=1,2,\dots,n$$

为了找到改善下时刻的跟踪精度而又使得当前控制 $u(t)$ 不能太大的控制规律，我们考虑 $t + \Delta t$ 时刻的跟踪误差的逐点优化性能指标，当前的控制性能指标为：

$$J(u(t)) = \frac{1}{2} [x(t + \Delta t) - q(t + \Delta t)]^T Q [x(t + \Delta t) - q(t + \Delta t)] + \frac{1}{2} [u(t) - u^*]^T R [u(t) - u^*] \quad (2.16)$$

其中, $Q \in R^{n \times n}$ 是正定的, $R \in R^{m \times m}$ 是半正定的。

对于给定的 $x(t)$ 和 $q(t)$, 使 J 为最小的唯一控制规律可以通过求解 $\frac{\partial J}{\partial u(t)} = 0$ 得到。

$$u(t) = -[A(\Delta t)w(x)]^T Q A(\Delta t)w(x) + R]^{-1} * [(A(\Delta t)w(x))^T Q (e(t) + v(x, \Delta t) - d(t, \Delta t)) - Ru^*] \quad (2.17)$$

上式给出了所得到的控制 $u(t) \in U$, 其中 $e(t) = x(t) - q(t)$ 是当前跟踪误差。

当动态系统是线性的, 在时间上是离散的, Δt 等于采样周期, 性能指标减少到所谓的一步超前预测控制公式。对于连续的非线性系统, 控制规律能够被看作是离散预测控制的推广, 在连续系统中步长 Δt 的任意性实际上是更合适的, 这样 Δt 的值能够按照要求被调节, 这是离散系统不具备的优点, 控制器一旦被设计出来, Δt 就被当作控制器参数, 并不是积分步长。实际上, Δt 在整个 $t \in [0, t_f]$ 区间内保持恒定不变甚至是没有必要的。在对 Δt 优化 J 的基础上连续调节 Δt 可以进一步改善控制器性能。因为使用了Taylor级数展开, 很自然的直观印象: Δt 应该是很小, 控制规律才是有效的, Δt 的大小只影响收敛的速度, 而不影响闭环稳定性。另一方面, 当存在模型不确定性的情况下, 较小的 Δt 确实能给出较好的跟踪精度。

注意的问题:

首先关于权矩阵的选择

引入权矩阵的目的是为了根据实际情况和设计要求, 对于不同状态量的动态特性给予不同的重视。权矩阵 Q 可取为对角阵或满阵, 但一般在设计中都取其取为对角阵, 这种取法物理意义比较明确。例如, 当我们希望对应某台发电机的机电振荡模式有高的阻尼时, 可以把 Q 阵中对应于这台发电机状态量 δ, ω 的对角元素取得大一些, 这样即使目标函数的对应项有较大的系数, 其实质是

对这两个状态量的波动给以较大的制约,从而使它们的振荡平息较快。在目标函数中引入 $U^T R U$ 项的目的是使对控制量也有一个约束。如果没有这一项的话,所设计的控制器中控制量的变化范围可能非常大,以至于在实际系统中根本无法实现。例如,电力系统中发电机的励磁电压是有限的,超过其限度的控制量将被限幅,使我们设计的控制规律发生畸变。

从实际系统的要求出发,靠权矩阵的合适选择来使励磁控制器更侧重于改善系统某一方面的控制目标;同样也可以靠权矩阵的适当选择使励磁控制器的参数整定到兼顾多种控制目标的要求。

多机电力系统的非线性励磁预测控制器,当权矩阵给定后,所设计的同一控制器的各反馈变量之间以及各控制器之间将协调一致地工作,使所给定的全系统性能指标达到最优。但以上所说的协调是针对事先给定的权矩阵而言的,如何选择权矩阵,使控制效果满足工程要求往往是多目标的需要,可作为进一步的探讨。

其次是反馈变量的选择。

同步发电机的首要任务是在保证向电力系统输送有功电力的情况下维持机端电压的恒定,或向系统送更多的无功功率,因此励磁控制器的首要任务是调节励磁以达到维持发电机端电压的作用。在传统的励磁控制中,都引入电压偏差信号。非线性控制理论引入电力系统控制,使系统的功角稳定得到了质的改善,但在所设计的控制规律中都不含有电压偏差信号,因此电压调节精度得不到保证是其致命的缺点。从对电力系统的分析来看,调度部门要求每台发电机发出一定的有功外,还要保证机端电压恒定,即要求有较好的功角稳定性和电压动态特性。前者需要有功角、转速和有功反馈信号,后者需要有电压反馈信号。能直接把电压信号考虑到控制规律的设计中是预测控制应用到电力系统的突出特点。

2.4 小结

在本章中,本文的主要内容如下:

首先介绍了预测控制的理论基础,从预测模型,滚动优化,反馈校正这3个特点入手突出了预测控制理论的独特优势。

其次，介绍了几个重要概念，如仿射非线性系统，李导数，控制系统的二次性能指标，尤其详细的介绍了多机系统的电压稳定性与动静态稳定性之间的相互关系以及系统的动态稳定性和系统的暂态稳定性之间的相互关系。

最后，又介绍了仿射非线性系统的预测控制设计原理，为后续工作奠定了坚实的理论基础。

第3章 单机无穷大系统非线性励磁控制规律设计

本章在介绍控制系统的二次性能指标的基础上,进一步说明了非线性预测控制的设计原理,首先详细介绍了单机无穷大系统的数学模型而后介绍了一种基于目标状态方程(TSE)的改进非线性励磁控制规律的设计原理,并与基于TSE的非线性励磁控制规律,线性最优控制规律进行了仿真比较。

3.1 单机无穷大系统的数学模型

3.1.1 单机无穷大系统的经典数学模型

本文采用单机无穷大电力系统模型来考察发电机的励磁控制问题。在模型中,忽略发电机定子、变压器和输电线路的电阻,同时考虑励磁功率系统为快速励磁系统,系统模型如图3.1所示。

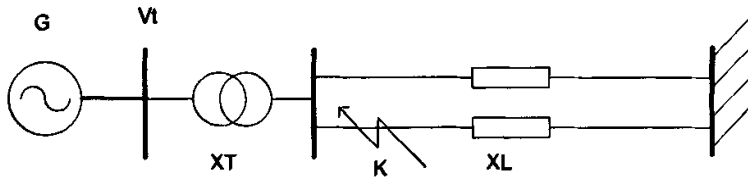


图 3-1 单机-无穷大电力系统模型图

Fig. 3-1 Single-machine infinite-bus power system

图3.1所示的发电机励磁控制系统模型可用如下的三阶微分方程来描述:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{H} P_m - \frac{D}{H} (\omega - \omega_0) - \frac{\omega_0}{H} P_e \\ \dot{E}_q' = -\frac{x_{d\Sigma}}{T_{d0}' x_{d\Sigma}} E_q' + \frac{(x_d - x_d') V_s \cos \delta}{T_{d0}' x_{d\Sigma}} + \frac{1}{T_{d0}'} E_f \end{cases} \quad (3.1)$$

式中: E_q' , δ 和 ω 为状态变量, 分别代表发电机暂态电势、发电机功角和发电机转子角速度, ω 为有名值。 E_f 为控制量, 代表发电机励磁电压。 H 为发电机组转子的转动惯量时间常数, 单位为秒, P_m 为发电机的输入机械功率。 T_{d0}' 为定子开路时的励磁绕组时间常数, D 为发电机阻尼系数, ω_0 为发电机转子同步角

速度, x_d 为发电机直轴电抗, x_d' 为发电机直轴暂态电抗, $x_e = x_r + x_L/2$ 为变压器和输电线路的总等效电抗, $x_{d\Sigma} = x_d' + x_e$, V_s 为无穷大母线电压。式中除了 δ 的单位为弧度(rad), 时间常数的单位为秒(s), 其余均为标么值。

这个数学模型的状态变量为 $X = [E_q', \omega_i, \delta_i]^T$, 由于在实际工程中, E_q' 不是一个易于测量的量, 同时发电机的机端电压 V_i 是一个很重要的量, 把 V_i 作为一个状态变量也便于观察发电机端电压的变化情况对它进行控制, 使之维持在给定的电压水平, 这对整个系统都是很重要的。为此, 我们为励磁控制系统重新建立数学模型, 用另一组状态变量来表示该系统, 即 $[V_u, P_{ei}, \dot{\omega}_i]$ 。另外, 下面我们来推导用 $[V_u, P_{ei}, \dot{\omega}_i]$ 来描述单机无穷大系统的微分方程组, 再根据第二章的预测控制的基本理论推导出该系统的励磁预测控制规律。

3.1.2 以 $[V_u, P_{ei}, \dot{\omega}_i]$ 为状态变量的单机无穷大系统的数学模型

用 $[V_u, P_{ei}, \dot{\omega}_i]$ 来描述单机系统的状态方程, 具体推导如下:

同步发电机机端电压方程为

$$\begin{aligned} V_{iq} &= E_q' - I_d x_d' \\ V_{id} &= I_q x_q \\ V_i^2 &= V_{iq}^2 + V_{id}^2 \end{aligned} \quad (3.2)$$

电流方程为:

$$\begin{cases} I_d = \frac{E_q' - V_s \cos \delta}{x_{d\Sigma}} \\ I_q = \frac{V_s \sin \delta}{x_{q\Sigma}} \end{cases} \quad (3.3)$$

上式中: V_{id} 为发电机机端电压直轴分量, V_{iq} 为发电机机端电压交轴分量, x_q 为发电机交轴电抗, $x_{q\Sigma} = x_q + x_e$, 其余所述各量均为标么值。

发电机输出的有功功率表达式为:

$$P_e = E_q' I_q \quad (3.4)$$

我们可以进一步求得以 V_t 、 P_e 、 $\dot{\omega}$ 为状态变量的单机无穷大系统励磁控制的数学模型

$$\begin{aligned}\dot{V}_t &= \frac{1}{V_t} [V_{td} \dot{V}_{td} + V_{tq} \dot{V}_{tq}] = \frac{1}{V_t} [V_{td} \dot{I}_q x_q + V_{tq} (\dot{E}_q' - \dot{I}_d x_d')] \\ &= \frac{1}{V_t} [I_q x_q \dot{I}_q x_q - (E_q' - I_d x_d') \dot{I}_d x_d' + \frac{E_q' - I_d x_d'}{T_{d0}} (V_f - E_q)] \\ \dot{P}_e &= \dot{E}_q' I_q + E_q' \dot{I}_q = \frac{1}{T_{d0}} (V_f - E_q) I_q + E_q' \dot{I}_q\end{aligned}\quad (3.5)$$

$$\dot{\omega} = -\frac{\omega_0}{H} \dot{P}_e - \frac{D}{H} \dot{\omega} = -\frac{\omega_0}{H} \left[\frac{1}{T_{d0}} (V_f - E_q) I_q + E_q' \dot{I}_q \right] - \frac{D}{H} \dot{\omega}$$

3.2 基于 TSE 的非线性励磁预测控制设计

对于预测控制来说，关键在于怎样根据控制对象的已知信息做出较好的预测，也就是预测建模。在本节，我们将提出一种非线性预测控制的设计方法，即基于目标状态方程（Target State Equation, 简称 TSE）的非线性预测控制设计。

首先，我们利用框图来更直观的展现一下该设计方法的整体思路，

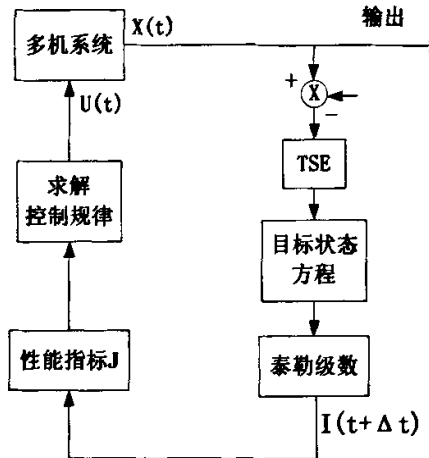


图3-2 基于TSE的设计原理框图

Fig.3-2 Principium Diagram of Target State Equation

定义 目标状态方程 (TSE) 如下:

$$\dot{I}_\Delta = X - X_r \quad (3.6)$$

式中: X_r 为状态向量 X 的参考轨迹。

在上述定义的目标状态方程中, 既包含了输出变量又同时包含了跟踪轨迹。根据自动控制原理, 我们可知, 积分环节的引入可以有效地消除系统的稳态误差, 所以该设计在消除输出变量的稳态误差和提高系统的动态特性方面效果显著。

基于预测控制理论, 我们将 $I_\Delta(t + \Delta t)$ 在 t 时刻进行泰勒级数展开, 可得到用 $I_\Delta(t + \Delta t)$ 表示的 $U(t)$ 的矢量函数形式如下:

$$I_\Delta(t + \Delta t) \approx I_\Delta(t) + \psi(X(t), \Delta t) + A(\Delta t)\Omega(X(t))U - \Gamma(X_r, \Delta t) \quad (3.7)$$

式中:

$$I_\Delta(t) = \int (X - X_r) dt \quad (3.8)$$

$$\Psi(X(t), \Delta t) = [\Psi_1(X(t), \Delta t), \dots, \Psi_n(X(t), \Delta t)]^T \quad (3.9)$$

基于该目标状态方程, 为了更好的跟踪状态向量的误差, 改善下一时刻的跟踪精度, 实现精确跟踪, 逐点优化性能指标的目的, 特取二次性能指标为:

$$J(u(t)) = \frac{1}{2} [I_\Delta(t + \Delta t) - 0]^T Q [I_\Delta(t + \Delta t) - 0] + \frac{1}{2} [u(t) - u^*]^T R [u(t) - u^*] \quad (3.10)$$

式中: $Q \in R^{n \times n}$ 是半正定的, $R \in R^{m \times m}$ 是正定的。

对上述性能指标求 $\frac{\partial J}{\partial U(t)} = 0$ 可得控制规律的表达式为:

$$U(t) = -[[\Lambda(\Delta t)\Omega(X(t))]^T Q \Lambda(\Delta t)\Omega(X(t)) + R]^{-1} * \\ [[\Lambda(\Delta t)\Omega(X(t))]^T Q (I_\Delta(t) + \Psi - \Gamma) - R U_r^*] \quad (3.11)$$

该控制规律是在上述性能指标的约束下得到的, 它实现了控制规律对工程实际所关心变量的控制, 使得这些量能够对它们的参考轨迹进行准确跟踪。

3.3 基于 TSE 的一种改进设计

选取发电机的目标状态方程为

$$\begin{cases} \dot{I}_{\Delta 1} = (V_i - V_r) + \dot{V}_i \\ \dot{I}_{\Delta 2} = (P_e - P_r) + \dot{P}_e \\ \dot{I}_{\Delta 3} = (\omega - \omega_r) + \dot{\omega} \end{cases} \quad (3.12)$$

把目标状态方程在 t 处展开为 Taylor 级数, 即有

$$I_{\Delta}(t + \Delta t) \approx I_{\Delta}(t) + \Delta t \dot{I}_{\Delta}(t) + \frac{\Delta t^2}{2!} \ddot{I}_{\Delta}(t) \quad (3.13)$$

设预测方程的步长为 Δt , 则有预测输出方程为

$$\begin{cases} I_{\Delta 1}(t + \Delta t) \approx \int (V_i - V_r) dt + V_i - V_r + \Delta t [(V_i - V_r) + \dot{V}_i] \\ I_{\Delta 2}(t + \Delta t) \approx \int (P_e - P_r) dt + P_e - P_r + \Delta t [(P_e - P_r) + \dot{P}_e] \\ I_{\Delta 3}(t + \Delta t) \approx \int (\omega - \omega_r) dt + \omega - \omega_r + \Delta t [(\omega - \omega_r) + \dot{\omega}] + \frac{\Delta t^2}{2!} [\ddot{\omega} + \ddot{\omega}] \end{cases} \quad (3.14)$$

将单机无穷大系统的数学模型带入到预测输出方程中有

$$\begin{aligned} I_{\Delta 1}(t + \Delta t) &\approx \int (V_i - V_r) dt + V_i - V_r + \Delta t [(V_i - V_r) \\ &\quad + \frac{1}{V_i} (I_q x_q \dot{I}_q x_q - (E'_q - I_d x'_d) \dot{I}_d x'_d + \frac{E'_q - I_d x'_d}{T_{d0}} (V_f - E_q))] \\ I_{\Delta 2}(t + \Delta t) &\approx \int (P_e - P_r) dt + P_e - P_r + \Delta t [(P_e - P_r) + (\frac{1}{T_{d0}} (V_f - E_q) I_q + E'_q \dot{I}_q)] \\ I_{\Delta 3}(t + \Delta t) &\approx \int (\omega - \omega_r) dt + \omega - \omega_r + \Delta t [(\omega - \omega_r) + (\frac{\omega_0}{H} P_{mi} - \frac{D}{H} (\omega - \omega_0) \\ &\quad - \frac{\omega_0}{H} P_e)] + \frac{\Delta t^2}{2!} [(\frac{\omega_0}{H} P_{mi} - \frac{D}{H} (\omega - \omega_0) - \frac{\omega_0}{H} P_e) + (-\frac{\omega_0}{H_i} [\frac{1}{T_{d0i}} (V_{fi} - E_{qi}) I_{qi} + \\ &\quad E'_{qi} \dot{I}_{qi}] - \frac{D_i}{H_i} (\frac{\omega_0}{H} P_{mi} - \frac{D}{H} (\omega - \omega_0) - \frac{\omega_0}{H} P_e))] \end{aligned} \quad (3.15)$$

将得到的预测方程整理为如下形式

$$I_{\Delta}(t+\Delta t) \approx I_{\Delta}(t) + \psi(X(t), \Delta t) + A(\Delta t)\Omega(X(t))U - \Gamma(X_r, \Delta t) \quad (3.16)$$

选定误差权矩阵 $Q = \text{diag}[q_1, q_2, q_3]$ 及控制权 $R = \text{diag}[r]$, 则根据上述各式可求得非线性励磁预测控制规律为

$$U(t) = -[[A(\Delta t)\Omega(X(t))]^T Q A(\Delta t)\Omega(X(t)) + R]^{-1} * \\ [[A(\Delta t)\Omega(X(t))]^T Q [I_{\Delta}(t) + \Psi(X(t), \Delta t) - \Gamma(X_r, \Delta t)] - R U_f'] \quad (3.17)$$

3.4 仿真比较考察

，为了考察所设计的控制规律的有效性，选择参数如下的单机无穷大系统为仿真模型，进行有功功率的调节扰动验证

$$x_d = 2.12; \quad x_q = 2.12; \quad x_d' = 0.26; \quad x_e = 0.24; \quad D = 2; \quad H = 4.06; \quad T_{d0}' = 5.8$$

首先，将基于 TSE 控制规律与线性最优控制规律应用于单机系统机械扰动的情况，即在 1 秒时将发电机有功功率给定值阶跃调高 20%，在 MATLAB 环境中进行仿真后系统有关状态量 V_t , P_e 和 ω 的响应曲线如图 3-3 所示，图中实线为在 TSE 控制规律作用下单机系统的响应曲线，虚线为在线性最优控制规律(ILOEC)作用下单机系统的响应曲线：

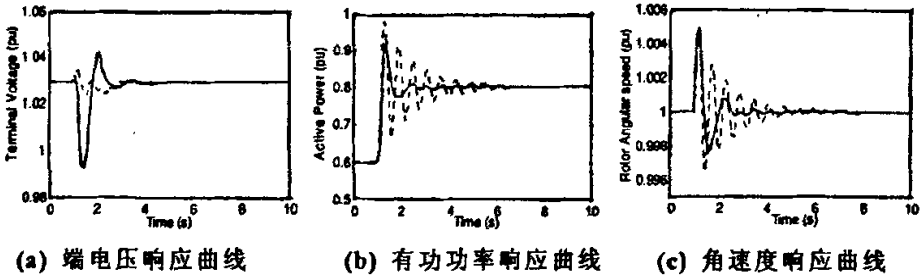
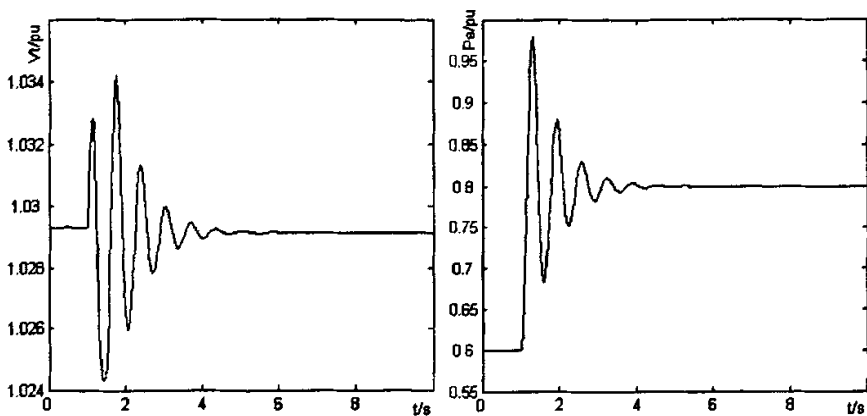


图 3-3 TSE 与线性最优控制规律机械扰动曲线

Fig.3-3 Responses of the system to disturbance of prime mover input
under TSE controller and ILOEC controller

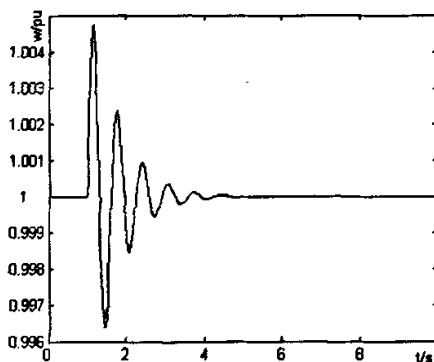
其次，同样将单机系统中发电机的有功功率在 1 秒时将给定值阶跃调高 20%，在基于 TSE 改进设计控制规律的作用下单机系统的响应曲线其响应曲线

如图 3-4 所示。



(a) 机端电压响应曲线

(b) 有功功率响应曲线



(c) 角速度响应曲线

图 3-4 机端电压、有功功率、角速度响应曲线

Fig.3-4 Responses of the system to disturbance of prime mover input
under ameliorative TSE controller

由图 3-4-a 可以看出，基于 TSE 改进设计的控制规律与基于 TSE 的控制规律、线性最优控制规律相比，不仅保留了可以使发电机机端电压准确跟踪给定值，且收敛速度较快的优点，而且更进一步减小了超调量。由图 3-4-b，图 3-4-c 可以看出，在改进设计的控制规律的作用下有功功率 P_e 和角速度 ω 的摆动平息效果均良好，尤其是角速度 ω 明显缩短了达到稳定的时间，很快达到平衡状态。

通过仿真比较可以说明这种改进的控制规律的控制效果是很好的。

3.5 小结

在本章中，我们首先介绍了单机无穷大系统的经典数学模型，为了便于满足工业上要求，继而推导了以 $[V_u, P_{ei}, \dot{\omega}_i]$ 为状态变量的单机无穷大系统的数学模型。

其次，以基于 TSE 的非线性预测励磁控制设计为基础，本文提出了 TSE 的一种改进设计，并将该设计与基于 TSE 的非线性控制设计、线性最优控制设计进行了仿真比较考察。

在后续章节中，本文将把基于差分的非线性预测控制设计和基于 TSE 的非线性预测控制设计与多机系统的数学模型相结合得到非线性励磁预测控制规律的具体推导过程。

第4章 多机系统非线性励磁控制系统的设计

在本章中,本文首先在多机系统数学模型的基础上,提出了两种多机系统非线性励磁预测控制的设计:基于差分的非线性励磁预测控制设计和基于 TSE 的非线性励磁预测控制设计,并以安德森 3 机系统为仿真模型考察其控制效果。

4.1 多机电力系统的数学模型

4.1.1 多机电力系统的经典数学模型

我们首先要建立具有 n 台发电机的电力系统数学模型(经典形式)。在建立模型时假设发电机均采用快速励磁方式,即励磁机的时间常数 T_e 为零。

令第 i 台发电机电势矢量 \bar{E}_{qi} 对作为参考节点电压矢量 \bar{V}_i 之间的夹角为 δ_i , 则有

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \\ \frac{H}{2\pi f_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e - P_D \\ P_D = \frac{D}{2\pi f_0} \frac{d\delta}{dt} \end{cases} \quad (4.1)$$

其中: ω 为转子的机械角速度,在同步转速时, ω 为有名值, H 为发电机组转子的转动惯量时间常数,单位为秒, P_D 为阻尼功率, P_e 为电磁功率, P_m 为机械功率,可列写 n 机系统转子运动方程

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_0 \\ \dot{\omega}_i = \frac{\omega_0}{H_i} P_{mi} - \frac{D_i}{H_i} (\omega_i - \omega_0) - \frac{\omega_0}{H_i} P_{ei} \end{cases} \quad (4.2)$$

此处,变量和参量的下标 i 是机组的编号, $i=1,2,\dots,n$ 另外,在 n 机系统中

$$P_{ei} = G_{ii} E_{qi}^2 + E_{qi}' \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} E_{qj}' \cos(\delta_{ij} - \alpha_{ij}) \quad (4.3)$$

这里, G_{ii} 为第 i 节点电导, Y_{ij} 为第 i 节点与第 j 节点之间的导纳; $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$;

α_y 为阻抗角的余角。

第 i 台发电机转子绕组电磁动态过程方程为

$$\dot{E}'_{qi} = -\frac{1}{T_{d0i}} E'_{qi} + \frac{1}{T_{d0i}} V_f \quad (4.4)$$

我们知道, q 轴暂态电势 E'_q 与 q 轴电势 E_q 之间的关系为

$$E_q = E'_q + I_d(x_d - x'_d) \quad (4.5)$$

同时, 在多机系统中电流 I_{di} 的表达式为

$$I_{di} = B_{ii} E'_{qi} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} E'_{qj} \cos(\delta_{ij} - \alpha_{ij}) \quad (4.6)$$

综上所述, 有

$$\dot{E}'_{qi} = -\frac{1 + (x_{di} - x'_{di})B_{ii}}{T_{d0i}} E'_{qi} + \frac{x_{di} - x'_{di}}{T_{d0i}} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} E'_{qj} \cos(\delta_{ij} - \alpha_{ij}) + \frac{1}{T_{d0i}} V_f \quad (4.7)$$

$i = 1, 2, \dots, n$, 上式中 B_{ii} 为第 i 节点的电纳。

综合以上各式, 我们得到多机系统中发电机具有励磁控制的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{E}'_{qi} = -\frac{1 + (x_{di} - x'_{di})B_{ii}}{T_{d0i}} E'_{qi} + \frac{x_{di} - x'_{di}}{T_{d0i}} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} E'_{qj} \cos(\delta_{ij} - \alpha_{ij}) + \frac{1}{T_{d0i}} V_f \\ \dot{\omega}_i = -\frac{\omega_0}{H_i} (G_{ii} E_{qi}^2 + E'_{qi} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} E'_{qj} \cos(\delta_{ij} - \alpha_{ij})) - \frac{D_i}{H_i} (\omega_i - \omega_0) + \frac{\omega_0}{H_i} P_{mi} \\ \dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_0 \end{cases} \quad (4.8)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

上式可写成标准仿射非线性系统的形式

$$\dot{X} = f(X) + \sum_{i=1}^n g_i(X)u_i \quad (4.9)$$

其中

$$X = [E'_{q1}, E'_{q2}, \dots, E'_{qn}, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n]^T$$

$$f(X) = \begin{bmatrix} -\frac{1+(x_{d1}-x'_{d1})B_{11}}{T_{d01}}E'_{q1} + \frac{x_{d1}-x'_{d1}}{T_{d01}} \sum_{j=2}^n Y_{1j}E'_{qj} \cos(\delta_{1j}-\alpha_{1j}) \\ \dots \\ -\frac{1+(x_{dn}-x'_{dn})B_{nn}}{T_{d0n}}E'_{qn} + \frac{x_{dn}-x'_{dn}}{T_{d0n}} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq n}}^n Y_{nj}E'_{qj} \cos(\delta_{nj}-\alpha_{nj}) \\ -\frac{\omega_0}{H_1}(G_{11}E_{q1}^2 + E'_{q1} \sum_{j=2}^n Y_{1j}E'_{qj} \cos(\delta_{1j}-\alpha_{1j})) - \frac{D_1}{H_1}(\omega_1 - \omega_0) + \frac{\omega_0}{H_1}P_{m1} \\ \dots \\ -\frac{\omega_0}{H_n}(G_{nn}E_{qn}^2 + E'_{qn} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq n}}^n Y_{nj}E'_{qj} \cos(\delta_{nj}-\alpha_{nj})) - \frac{D_n}{H_n}(\omega_n - \omega_0) + \frac{\omega_0}{H_n}P_{mn} \\ \omega_1 - \omega_0 \\ \dots \\ \omega_n - \omega_0 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$g_1(X) = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{d01}} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad g_2(X) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{T_{d02}} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad \dots \quad g_n(X) = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \frac{1}{T_{d0n}} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

以上是发电机励磁控制系统的多机电力系统的数学模型——非线性状态方程(经典形式)。

4.1.2 以 $[V_n, P_{ei}, \dot{\omega}_i]$ 为状态变量的多机电力系统的数学模型

与单机系统的数学模型一样,这个数学模型的状态变量为 $X = [E'_q, \omega_i, \delta_i]^T$, 在了便于在实际工程中实现,我们同样重新建立励磁控制系统的数学模型,用 $[V_n, P_{ei}, \dot{\omega}_i]$ 来表示多机电力系统。下面我们来推导用 $[V_n, P_{ei}, \dot{\omega}_i]$ 来描述多机电力系统的微分方程组,再根据第二章的预测控制的基本理论推导出多机电力系统的励磁预测控制规律。

第 i 台发电机的机端电压的关系式为

$$\begin{aligned} V_{qi} &= E'_i - I_{di} x'_{di} \\ V_{di} &= I_{qi} x_{qi} \\ V_n^2 &= V_{qi}^2 + V_{di}^2 \end{aligned} \quad (4.11)$$

所以

$$\begin{aligned} \dot{V}_n &= \frac{1}{V_n} [V_{di} \dot{V}_{di} + V_{qi} \dot{V}_{qi}] = \frac{1}{V_n} [V_{di} \dot{I}_{qi} x_{qi} + V_{qi} (\dot{E}'_{qi} - \dot{I}_{di} x'_{di})] \\ &= \frac{1}{V_n} [I_{qi} x_{qi} \dot{I}_{qi} x_{qi} - (E'_{qi} - I_{di} x'_{di}) \dot{I}_{di} x'_{di} + \frac{E'_{qi} - I_{di} x'_{di}}{T_{d0i}} (V_n - E_{qi})] \end{aligned} \quad (4.12)$$

发电机的有功功率为

$$\begin{aligned} P_{ei} &= E'_{qi} I_{qi} \\ \dot{P}_{ei} &= \dot{E}'_{qi} I_{qi} + E'_{qi} \dot{I}_{qi} = \frac{1}{T_{d0i}} (V_n - E_{qi}) I_{qi} + E'_{qi} \dot{I}_{qi} \end{aligned} \quad (4.13)$$

转速 ω_i 的二阶导为

$$\ddot{\omega}_i = -\frac{\omega_0}{H_i} \dot{P}_{ei} - \frac{D_i}{H_i} \dot{\omega}_i = -\frac{\omega_0}{H_i} \left[\frac{1}{T_{d0i}} (V_n - E_{qi}) I_{qi} + E'_{qi} \dot{I}_{qi} \right] - \frac{D_i}{H_i} \dot{\omega}_i \quad (4.14)$$

我们可以把电力系统励磁控制系统的数学模型重新写为

$$\begin{cases} \dot{V}_{ti} = \frac{1}{V_{ti}} [I_{qi} x_{qi} \dot{I}_{qi} x_{qi} - (E'_{qi} - I_{di} x'_{di}) \dot{I}_{di} x'_{di} + \frac{E'_{qi} - I_{di} x'_{di}}{T_{d0i}} (V_{fi} - E_{qi})] \\ \dot{P}_{ei} = \frac{1}{T_{d0i}} (V_{fi} - E_{qi}) I_{qi} + E'_{qi} \dot{I}_{qi} \\ \dot{\omega}_i = -\frac{\omega_0}{H_i} [\frac{1}{T_{d0i}} (V_{fi} - E_{qi}) I_{qi} + E'_{qi} \dot{I}_{qi}] - \frac{D_i}{H_i} \dot{\omega}_i \end{cases} \quad (4.15)$$

将上式写成标准仿射非线性系统的形式

$$\dot{X} = f(X) + \sum_{i=1}^n g_i(X) u_i \quad (4.16)$$

其中

$$f_i(X)_i = \begin{bmatrix} \frac{1}{V_{ti}} [I_{qi} x_{qi} \dot{I}_{qi} x_{qi} - (E'_{qi} - I_{di} x'_{di}) \dot{I}_{di} x'_{di} - \frac{E'_{qi} - I_{di} x'_{di}}{T_{d0i}} E_{qi}] \\ -\frac{1}{T_{d0i}} E_{qi} I_{qi} + E'_{qi} \dot{I}_{qi} \\ \frac{\omega_0}{H_i} [\frac{1}{T_{d0i}} E_{qi} I_{qi} - E'_{qi} \dot{I}_{qi}] - \frac{D_i}{H_i} \dot{\omega}_i \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$$g_i(X)_i = \begin{bmatrix} g_{i1} \\ g_{i2} \\ g_{i3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E'_{qi} - I_{di} x'_{di}}{T_{d0i} V_{ti}} \\ \frac{I_{qi}}{T_{d0i}} \\ -\frac{\omega_0}{H_i} \frac{I_{qi}}{T_{d0i}} \end{bmatrix} \quad X_i = [V_{ti}, P_{ei}, \dot{\omega}_i]^T$$

4.2 基于差分的非线性预测励磁控制设计

基于差分的非线性预测控制设计的实质是将差分方程作为连接多机系统励磁控制与预测控制的纽带,从而达到把未来信息引入励磁控制规律的目的,从而体现预测控制的思想精髓。

状态变量的差分方程为

$$\dot{X}(t) = \frac{X(t + \Delta t) - X(t)}{\Delta t} \quad (4.18)$$

显然, 由此差分方程可以求出状态变量的预测值

$$X(t + \Delta t) = X(t) + \Delta t \dot{X}(t) \quad (4.19)$$

然后将状态变量的数学模型带入上式, 就可以求得状态变量的预测值的表达式, 并进一步调整为下面的形式

$$X(t + \Delta t) = X(t) + \Psi(X(t), \Delta t) + A(\Delta t)\Omega(X(t))U \quad (4.20)$$

由预测控制的基本理论可知, 考虑跟踪误差和当前的控制性能的二次性能指标为

$$J(u(t)) = \frac{1}{2} [X(t + \Delta t) - X_r(t + \Delta t)]^T Q [X(t + \Delta t) - X_r(t + \Delta t)] + \frac{1}{2} [u(t) - u^*]^T R [u(t) - u^*] \quad (4.21)$$

式中: $Q \in R^{n \times n}$ 是半正定的, $R \in R^{m \times m}$ 是正定的误差权矩阵。

对上述性能指标求 $\frac{\partial J}{\partial U(t)} = 0$ 可得控制规律的表达式为:

$$U(t) = -[[A(\Delta t)\Omega(X(t))]^T Q A(\Delta t)\Omega(X(t)) + R]^{-1} * [[A(\Delta t)\Omega(X(t))]^T Q (e(t) + \Psi) - R U_f^*] \quad (4.22)$$

其中: U_f^* 为发电机励磁电压的初始值, 误差 $e_i(t)$

$$e_i(t) = \begin{bmatrix} x_{i1}(t) - x_{i1}^* \\ x_{i2}(t) - x_{i2}^* \\ x_{i3}(t) - x_{i3}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ti}(t) - V_{ti}^* \\ P_{ei}(t) - P_{ei0} \\ \dot{\omega}(t) - 0 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

以差分方程为基础的非线性预测励磁控制规律的推导过程如下:

首先根据第二章预测控制理论的基本公式

$$X(t+\Delta t) = X(t) + \Psi(X(t), \Delta t) + A(\Delta t)\Omega(X(t))U \quad (4.24)$$

其中, Δt 是预测步长, 求出状态变量的预测值, 即

$$\begin{cases} V_n(t+\Delta t) = V_n(t) + \Psi_{n1} + (\Lambda\Omega)_{n1}U(t) \\ P_{ei}(t+\Delta t) = P_{ei}(t) + \Psi_{i2} + (\Lambda\Omega)_{i2}U(t) \\ \dot{\omega}_i(t+\Delta t) = \dot{\omega}_i(t) + \Psi_{i3} + (\Lambda\Omega)_{i3}U(t) \end{cases} \quad (4.25)$$

由差分方程可知

$$\begin{cases} \dot{V}_n(t) = \frac{V_n(t+\Delta t) - V_n(t)}{\Delta t} \\ \dot{P}_{ei}(t) = \frac{P_{ei}(t+\Delta t) - P_{ei}(t)}{\Delta t} \\ \dot{\omega}_i(t) = \frac{\dot{\omega}_i(t+\Delta t) - \dot{\omega}_i(t)}{\Delta t} \end{cases} \quad (4.26)$$

也就是说, 根据差分方程, $V_n(t+\Delta t), P_{ei}(t+\Delta t), \dot{\omega}_i(t+\Delta t)$ 可以表示为如下形式

$$\begin{cases} V_n(t+\Delta t) = V_n(t) + \Delta t \dot{V}_n(t) \\ P_{ei}(t+\Delta t) = P_{ei}(t) + \Delta t \dot{P}_{ei}(t) \\ \dot{\omega}_i(t+\Delta t) = \dot{\omega}_i(t) + \Delta t \dot{\omega}_i(t) \end{cases} \quad (4.27)$$

将上述章节中求得的以 $[V_n, P_{ei}, \dot{\omega}_i]$ 为状态变量的多机电力系统的数学模型带入到上述差分方程中, 可得

$$\begin{cases} V_n(t+\Delta t) = V_n(t) + \frac{\Delta t}{V_n} [I_{qi}x_{qi}\dot{I}_{qi}x_{qi} - (E_{qi}' - I_{di}x_{di}')\dot{I}_{di}x_{di}' + \frac{E_{qi}' - I_{di}x_{di}'}{T_{d0i}}(V_{\beta} - E_{qi})] \\ P_{ei}(t+\Delta t) = P_{ei}(t) + \frac{\Delta t}{T_{d0i}}(V_{\beta} - E_{qi})I_{qi} + \Delta t E_{qi}'\dot{I}_{qi} \\ \dot{\omega}_i(t+\Delta t) = \dot{\omega}_i(t) + \Delta t \left\{ -\frac{\omega_0}{H_i} \left[\frac{1}{T_{d0i}}(V_{\beta} - E_{qi})I_{qi} + E_{qi}'\dot{I}_{qi} \right] - \frac{D_i}{H_i}\dot{\omega}_i \right\} \end{cases} \quad (4.28)$$

与预测控制理论的基本公式相对照可以将上式整理为

$$\begin{cases}
V_n(t+\Delta t) = V_n(t) + \frac{\Delta t}{V_n} [I_{qi} x_{qi} \dot{I}_{qi} x_{qi} - (E_{qi}' - I_{di} x_{di}') \dot{I}_{di} x_{di}' - \frac{E_{qi}' - I_{di} x_{di}'}{T_{d0i}} E_{qi}] \\
+ \frac{\Delta t}{V_n} \frac{E_{qi}' - I_{di} x_{di}'}{T_{d0i}} V_{fi} \\
P_{ei}(t+\Delta t) = P_{ei}(t) - \frac{\Delta t}{T_{d0i}} E_{qi} I_{qi} + \Delta t E_{qi}' \dot{I}_{qi} + \frac{\Delta t}{T_{d0i}} I_{qi} V_{fi} \\
\dot{\omega}_i(t+\Delta t) = \dot{\omega}_i(t) + \Delta t [-\frac{\omega_0}{H_i} (-\frac{1}{T_{d0i}} E_{qi} I_{qi} + E_{qi}' \dot{I}_{qi}) - \frac{D_i}{H_i} \dot{\omega}_i] - \Delta t \frac{\omega_0}{H_i} \frac{I_{qi}}{T_{d0i}} V_{fi}
\end{cases}$$

$$\Psi(X(t), \Delta t) = \begin{bmatrix} \Psi_{i1} \\ \Psi_{i2} \\ \Psi_{i3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{V_n} [I_{qi} x_{qi} \dot{I}_{qi} x_{qi} - (E_{qi}' - I_{di} x_{di}') \dot{I}_{di} x_{di}' - \frac{E_{qi}' - I_{di} x_{di}'}{T_{d0i}} E_{qi}] \\ -\frac{\Delta t}{T_{d0i}} E_{qi} I_{qi} + \Delta t E_{qi}' \dot{I}_{qi} + \frac{\Delta t}{T_{d0i}} I_{qi} V_{fi} \\ \Delta t [-\frac{\omega_0}{H_i} (-\frac{1}{T_{d0i}} E_{qi} I_{qi} + E_{qi}' \dot{I}_{qi}) - \frac{D_i}{H_i} \dot{\omega}_i] \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

$$\Lambda\Omega = \begin{bmatrix} \Lambda\Omega_{i1} \\ \Lambda\Omega_{i2} \\ \Lambda\Omega_{i3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{V_n} \frac{E_{qi}' - I_{di} x_{di}'}{T_{d0i}} \\ \frac{\Delta t}{T_{d0i}} I_{qi} \\ -\Delta t \frac{\omega_0}{H_i} \frac{I_{qi}}{T_{d0i}} \end{bmatrix} \quad X(t) = [V_n(t), P_{ei}(t), \dot{\omega}_i(t)]^T$$

由第二章的预测控制的基本理论知, 考虑跟踪误差和当前的控制性能的二次性能指标为

$$\begin{aligned}
J(u(t)) &= \frac{1}{2} [X(t+\Delta t) - X_r(t+\Delta t)]^T Q [X(t+\Delta t) - X_r(t+\Delta t)] + \\
&\frac{1}{2} [u(t) - u^*]^T R [u(t) - u^*]
\end{aligned} \quad (4.30)$$

式中: $Q \in R^{m \times m}$ 是半正定的, $R \in R^{m \times m}$ 是正定的误差权矩阵。

对上述性能指标求 $\frac{\partial J}{\partial U(t)} = 0$ 可得控制规律的表达式为:

$$U(t) = -[[A(\Delta t)\Omega(X(t))]^T Q A(\Delta t)\Omega(X(t)) + R]^{-1} * \\ [[A(\Delta t)\Omega(X(t))]^T Q(e(t) + \Psi) - RU_f^*] \quad (4.31)$$

其中

$$e_i(t) = \begin{bmatrix} x_{i1}(t) - x_{i1}^* \\ x_{i2}(t) - x_{i2}^* \\ x_{i3}(t) - x_{i3}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_u(t) - V_u \\ P_{ei}(t) - P_{ei0} \\ \dot{\omega}(t) - 0 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

对于这个数学模型有

$$V_f = U(t) = -P_i^{-1}(X_i)Q_i(X_i) \quad (4.33)$$

这里

$$P_i(X_i) = [A_i(\Delta t)\Omega_i(X_i)]^T Q_i A_i(\Delta t)\Omega_i(X_i) + R_i \\ Q_i(X_i) = [A_i(\Delta t)\Omega_i(X_i)]^T Q_i [e_i(\Delta t) + \Psi] - R_i u_i^* \quad (4.34)$$

将各矩阵向量带入即可求得多机电力系统基于差分方程的非线性励磁预测控制规律。

4.3 基于 TSE 的非线性励磁预测控制设计

与单机无穷大系统基于目标状态方程的控制规律的设计原理相同，设多机系统发电机的目标状态方程为

$$\begin{cases} \dot{I}_{\Delta 1i} = V_u - V_n \\ \dot{I}_{\Delta 2i} = P_{ei} - P_n \\ \dot{I}_{\Delta 3i} = \omega_i - \omega_n \end{cases} \quad (4.35)$$

把目标状态方程在 t 处展开为 Taylor 级数, 即有

$$I_{\Delta 1i}(t + \Delta t) \approx I_{\Delta 1i}(t) + \Delta t \dot{I}_{\Delta 1i}(t) + \frac{\Delta t^2}{2!} \ddot{I}_{\Delta 1i}(t) \quad (4.36)$$

设预测方程的步长为 Δt ，预测输出方程为

$$\begin{cases} I_{\Delta 1i}(t+\Delta t) \approx \int (V_{ii} - V_n) dt + \Delta t (V_{ii} - V_n) + \frac{\Delta t^2}{2!} \dot{V}_{ii} \\ I_{\Delta 2i}(t+\Delta t) \approx \int (P_{ei} - P_n) dt + \Delta t (P_{ei} - P_n) + \frac{\Delta t^2}{2!} \dot{P}_{ei} \\ I_{\Delta 3i}(t+\Delta t) \approx \int (\omega_i - \omega_n) dt + \Delta t (\omega_i - \omega_n) + \frac{\Delta t^2}{2!} \dot{\omega}_i + \frac{\Delta t^3}{3!} \ddot{\omega}_i \end{cases} \quad (4.37)$$

将多机电力系统的数学模型代入输出方程

$$\begin{aligned} I_{\Delta 1i}(t+\Delta t) &\approx \int (V_{ii} - V_n) dt + \Delta t (V_{ii} - V_n) + \frac{\Delta t^2}{2!} \dot{V}_{ii} = \int (V_{ii} - V_n) dt + \Delta t (V_{ii} - V_n) \\ &+ \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{1}{V_{ii}} [I_{qi} x_{qi} \dot{I}_{qi} x_{qi} - (E_{qi}' - I_{di} x_{di}') \dot{I}_{di} x_{di}' + \frac{E_{qi}' - I_{di} x_{di}'}{T_{d0i}} (V_{fi} - E_{qi})] = \int (V_{ii} - V_n) dt + \Delta t V_{ii} + \\ &\frac{\Delta t^2}{2!} \frac{1}{V_{ii}} [I_{qi} x_{qi} \dot{I}_{qi} x_{qi} - (E_{qi}' - I_{di} x_{di}') \dot{I}_{di} x_{di}' - \frac{E_{qi}' - I_{di} x_{di}'}{T_{d0i}} E_{qi}] + \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{1}{V_{ii}} \frac{E_{qi}' - I_{di} x_{di}'}{T_{d0i}} V_{fi} - \Delta t V_n \\ I_{\Delta 2i}(t+\Delta t) &\approx \int (P_{ei} - P_n) dt + \Delta t (P_{ei} - P_n) + \frac{\Delta t^2}{2!} \dot{P}_{ei} = \int (P_{ei} - P_n) dt + \Delta t (P_{ei} - P_n) \\ &+ \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{1}{T_{d0i}} (V_{fi} - E_{qi}) I_{qi} + E_{qi}' \dot{I}_{qi} = \int (P_{ei} - P_n) dt + \Delta t P_{ei} - \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{1}{T_{d0i}} E_{qi}' I_{qi} + \frac{\Delta t^2}{2!} E_{qi}' \dot{I}_{qi} \\ &+ \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{I_{qi}}{T_{d0i}} V_{fi} - \Delta t P_n \\ I_{\Delta 3i}(t+\Delta t) &\approx \int (\omega_i - \omega_n) dt + \Delta t (\omega_i - \omega_n) + \frac{\Delta t^2}{2!} \dot{\omega}_i + \frac{\Delta t^3}{3!} \ddot{\omega}_i = \int (\omega_i - \omega_n) dt + \Delta t (\omega_i - \omega_n) \\ &+ \frac{\Delta t^2}{2!} [\frac{\omega_0}{H_i} P_{mi} - \frac{D_i}{H_i} (\omega_i - \omega_0) - \frac{\omega_0}{H_i} P_{ei}] + \frac{\Delta t^3}{3!} \{-\frac{\omega_0}{H_i} [\frac{1}{T_{d0i}} (V_{fi} - E_{qi}) I_{qi} + E_{qi}' \dot{I}_{qi}]\} \\ &- \frac{\Delta t^3}{3!} \frac{D_i}{H_i} [\frac{\omega_0}{H_i} P_{mi} - \frac{D_i}{H_i} (\omega_i - \omega_0) - \frac{\omega_0}{H_i} P_{ei}] = \int (\omega_i - \omega_n) dt + \Delta t \omega_i + \frac{\Delta t^3}{3!} \frac{\omega_0}{H_i} \frac{I_{qi}}{T_{d0i}} E_{qi}' \\ &+ (\frac{\Delta t^2}{2!} - \frac{\Delta t^3}{3!} \frac{D_i}{H_i}) [\frac{\omega_0}{H_i} P_{mi} - \frac{D_i}{H_i} (\omega_i - \omega_0) - \frac{\omega_0}{H_i} P_{ei}] - \frac{\Delta t^3}{3!} \frac{\omega_0}{H_i} E_{qi}' \dot{I}_{qi} - \frac{\Delta t^3}{3!} \frac{\omega_0}{H_i} \frac{I_{qi}}{T_{d0i}} V_{fi} - \Delta t \omega_n \end{aligned} \quad (4.38)$$

假设预测方程形式如下

$$I_{\Delta}(t+\Delta t) \approx I_{\Delta}(t) + \psi(X(t), \Delta t) + \Lambda(\Delta t) \Omega(X(t)) U - \Gamma(X_r, \Delta t) \quad (4.39)$$

设各输出状态量的参考轨迹在一定的运行区间均是常数, 即

$$x_r(t + \Delta t) = x_r(t) \quad (4.40)$$

所以取 $V_n = V_0$, $P_n = P_0$, $\omega_n = \omega_0$ 时就有

$$\mathbf{I}_\Delta(t) = \begin{bmatrix} I_{\Delta 1}(t) \\ I_{\Delta 2}(t) \\ I_{\Delta 3}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int (V_n - V_0) dt \\ \int (P_{ei} - P_0) dt \\ \int (\omega_i - \omega_0) dt \end{bmatrix} \quad \mathbf{A}(\Delta t) \mathbf{\Omega}(X(t)) = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{1}{V_n} \frac{E'_{qi} - I_{di} \dot{x}_{di}}{T_{d0i}} \\ \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{I_{qi}}{T_{d0i}} \\ -\frac{\Delta t^3}{3!} \frac{\omega_0}{H_i} \frac{I_{qi}}{T_{d0i}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{\Gamma}(X_r, \Delta t) = \begin{bmatrix} \Delta t V_0 \\ \Delta t P_0 \\ \Delta t \omega_0 \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

$$\mathbf{\Psi}(X(t), \Delta t) = \begin{bmatrix} \Delta t V_n + \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{1}{V_n} [I_{qi} x_{qi} \dot{I}_{qi} x_{qi} - (E'_{qi} - I_{di} \dot{x}_{di}) \dot{I}_{di} \dot{x}_{di} - \frac{E'_{qi} - I_{di} \dot{x}_{di}}{T_{d0i}} E_{qi}] \\ \Delta t P_{ei} - \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{1}{T_{d0i}} E_{qi} I_{qi} + \frac{\Delta t^2}{2!} E_{qi} \dot{I}_{qi} \\ \Delta t \omega_i + (\frac{\Delta t^2}{2!} - \frac{\Delta t^3}{3!} \frac{D_i}{H_i}) [\frac{\omega_0}{H_i} P_{mi} - \frac{D_i}{H_i} (\omega_i - \omega_0) - \frac{\omega_0}{H_i} P_{ei}] \\ + \frac{\Delta t^3}{3!} \frac{\omega_0}{H_i} \frac{I_{qi}}{T_{d0i}} E_{qi} - \frac{\Delta t^3}{3!} \frac{\omega_0}{H_i} E_{qi} \dot{I}_{qi} \end{bmatrix}$$

选定误差权矩阵 $\mathbf{Q} = \text{diag}[q_1, q_2, q_3]$ 及控制权 $\mathbf{R} = \text{diag}[r]$, 则根据上述各式可求得非线性励磁预测控制规律为

$$\mathbf{U}(t) = -[[\mathbf{A}(\Delta t) \mathbf{\Omega}(X(t))]^T \mathbf{Q} \mathbf{A}(\Delta t) \mathbf{\Omega}(X(t)) + \mathbf{R}]^{-1} * \quad (4.42)$$

$$[[\mathbf{A}(\Delta t) \mathbf{\Omega}(X(t))]^T \mathbf{Q} [\mathbf{I}_\Delta(t) + \mathbf{\Psi}(X(t), \Delta t) - \mathbf{\Gamma}(X_r, \Delta t)] - \mathbf{R} \mathbf{U}'_f]$$

4.4 基于 TSE 的一种改进设计

本文在基于 TSE 的非线性励磁预测控制设计的基础上提出了一种改进设计。基于差分方程的设计方案在动态性能方面比基于目标状态方程的设计方案略有

优势,其原因在于基于目标状态方程的设计方案中带有积分环节。当然积分环节的引入并不是只有弊端,它可以很好的解决机端电压的静态偏移问题,而基于差分方程的设计方案在机端电压的静态偏移问题上就有明显的弱点。

综合上述两种方法的优缺点,我们将基于目标状态方程的设计方案做了进一步的改进,即增加比例环节,希望能够兼顾动态性能,得到较好的效果。

选取发电机的目标状态方程为

$$\begin{cases} \dot{I}_{\Delta 1i} = (V_{ii} - V_{ni}) + \dot{V}_{ii} \\ \dot{I}_{\Delta 2i} = (P_{ei} - P_{ni}) + \dot{P}_{ei} \\ \dot{I}_{\Delta 3i} = (\omega_i - \omega_n) + \dot{\omega}_i \end{cases} \quad (4.43)$$

设预测方程的步长为 Δt , 预测输出方程为

$$\begin{cases} I_{\Delta 1i}(t + \Delta t) \approx \int (V_{ii} - V_{ni}) dt + V_{ii} - V_{ni} + \Delta t[(V_{ii} - V_{ni}) + \dot{V}_{ii}] \\ I_{\Delta 2i}(t + \Delta t) \approx \int (P_{ei} - P_{ni}) dt + P_{ei} - P_{ni} + \Delta t[(P_{ei} - P_{ni}) + \dot{P}_{ei}] \\ I_{\Delta 3i}(t + \Delta t) \approx \int (\omega_i - \omega_n) dt + \omega_i - \omega_n + \Delta t[(\omega_i - \omega_n) + \dot{\omega}_i] + \frac{\Delta t^2}{2!}[\dot{\omega}_i + \ddot{\omega}_i] \end{cases} \quad (4.44)$$

将多机电力系统的数学模型代入输出方程

$$\begin{aligned} I_{\Delta 1i}(t + \Delta t) &\approx \int (V_{ii} - V_{ni}) dt + V_{ii} - V_{ni} + \Delta t(V_{ii} - V_{ni}) + \Delta t \dot{V}_{ii} = \int (V_{ii} - V_{ni}) dt + V_{ii} - V_{ni} \\ &+ \Delta t(V_{ii} - V_{ni}) + \frac{\Delta t}{V_{ii}} [I_{qi} x_{qi} \dot{I}_{qi} x_{qi} - (E_{qi}' - I_{di} x_{di}') \dot{I}_{di} x_{di}' + \frac{E_{qi}' - I_{di} x_{di}'}{T_{d0i}} (V_{fi} - E_{qi})] \\ &= \int (V_{ii} - V_{ni}) dt + V_{ii} - V_{ni} + \Delta t V_{ii} + \frac{\Delta t}{V_{ii}} [I_{qi} x_{qi} \dot{I}_{qi} x_{qi} - (E_{qi}' - I_{di} x_{di}') \dot{I}_{di} x_{di}' - \frac{E_{qi}' - I_{di} x_{di}'}{T_{d0i}} E_{qi}] \\ &+ \frac{\Delta t}{V_{ii}} \frac{E_{qi}' - I_{di} x_{di}'}{T_{d0i}} V_{fi} - \Delta t V_{ni} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{\Delta 2i}(t+\Delta t) &\approx \int (P_{ei} - P_n) dt + P_{ei} - P_n + \Delta t(P_{ei} - P_n) + \Delta t \dot{P}_{ei} = \int (P_{ei} - P_n) dt + P_{ei} - P_n \\
&+ \Delta t(P_{ei} - P_n) + \frac{\Delta t}{T_{d0i}}(V_{fi} - E_{qi})I_{qi} + \Delta t E'_{qi} \dot{I}_{qi} \approx \int (P_{ei} - P_n) dt + P_{ei} - P_n + \Delta t P_{ei} - \frac{\Delta t}{T_{d0i}} E_{qi} I_{qi} \\
&+ \Delta t E'_{qi} \dot{I}_{qi} + \Delta t \frac{I_{qi}}{T_{d0i}} V_{fi} - \Delta t P_n \\
I_{\Delta 3i}(t+\Delta t) &\approx \int (\omega_i - \omega_n) dt + \omega_i - \omega_n + \Delta t[(\omega_i - \omega_n) + \dot{\omega}_i] + \frac{\Delta t^2}{2!}[\dot{\omega}_i + \ddot{\omega}_i] \\
&= \int (\omega_i - \omega_n) dt + \omega_i - \omega_n + \Delta t(\omega_i - \omega_n) + \Delta t[\frac{\omega_0}{H_i} P_m - \frac{D_i}{H_i}(\omega_i - \omega_0) - \frac{\omega_0}{H_i} P_{ei}] \\
&+ \frac{\Delta t^2}{2!}[\frac{\omega_0}{H_i} P_m - \frac{D_i}{H_i}(\omega_i - \omega_0) - \frac{\omega_0}{H_i} P_{ei}] + \frac{\Delta t^2}{2!} \left\{ -\frac{\omega_0}{H_i} [\frac{1}{T_{d0i}}(V_{fi} - E_{qi})I_{qi} + E'_{qi} \dot{I}_{qi}] - \frac{D_i}{H_i} \dot{\omega}_i \right\} \\
&= \int (\omega_i - \omega_n) dt + \omega_i - \omega_n + \Delta t \omega_i + (\Delta t + \frac{\Delta t^2}{2!} - \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{D_i}{H_i}) [\frac{\omega_0}{H_i} P_m - \frac{D_i}{H_i}(\omega_i - \omega_0) - \frac{\omega_0}{H_i} P_{ei}] \\
&- \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{\omega_0}{H_i} [\frac{1}{T_{d0i}}(-E_{qi} I_{qi}) + E'_{qi} \dot{I}_{qi}] - \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{\omega_0}{H_i} \frac{I_{qi}}{T_{d0i}} V_{fi} - \Delta t \omega_n
\end{aligned} \tag{4.45}$$

假设预测方程形式如下

$$I_{\Delta}(t+\Delta t) \approx I_{\Delta}(t) + \psi(X(t), \Delta t) + \Lambda(\Delta t)\Omega(X(t))U - \Gamma(X_r, \Delta t) \tag{4.46}$$

设各输出状态量的参考轨迹在一定的运行区间均是常数，即

$$x_r(t+\Delta t) = x_r(t) \tag{4.47}$$

所以取 $V_n = V_0$, $P_n = P_0$, $\omega_n = \omega_0$ 时就有

$$I_{\Delta}(t) = \begin{bmatrix} I_{\Delta 1i}(t+\Delta t) \\ I_{\Delta 2i}(t+\Delta t) \\ I_{\Delta 3i}(t+\Delta t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int (V_n - V_0) dt + V_n - V_0 \\ \int (P_{ei} - P_0) dt + P_{ei} - P_0 \\ \int (\omega_i - \omega_0) dt + \omega_i - \omega_0 \end{bmatrix} \quad \Gamma(X_r, \Delta t) = \begin{bmatrix} \Delta t V_0 \\ \Delta t P_0 \\ \Delta t \omega_0 \end{bmatrix}$$

$$\Psi(X(t), \Delta t) = \begin{bmatrix} \Delta t V_u + \frac{\Delta t}{V_u} [I_{qi} x_{qi} \dot{I}_{qi} x_{qi} - (E'_{qi} - I_{di} x'_{di}) \dot{I}_{di} x'_{di} - \frac{E'_{qi} - I_{di} x'_{di}}{T_{d0i}} E_{qi}] \\ \Delta t P_{ei} - \frac{\Delta t}{T_{d0i}} E_{qi} I_{qi} + \Delta t E'_{qi} \dot{I}_{qi} \\ \Delta t \omega_i + (\Delta t + \frac{\Delta t^2}{2!} - \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{D_i}{H_i}) [\frac{\omega_0}{H_i} P_{mi} - \frac{D_i}{H_i} (\omega_i - \omega_0) - \frac{\omega_0}{H_i} P_{ei}] \\ + \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{\omega_0}{H_i} \frac{I_{qi}}{T_{d0i}} E_{qi} - \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{\omega_0}{H_i} E_{qi} \dot{I}_{qi} \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

$$A(\Delta t) \Omega(X(t)) = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{1}{V_u} \frac{E'_{qi} - I_{di} x'_{di}}{T_{d0i}} \\ \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{I_{qi}}{T_{d0i}} \\ -\frac{\Delta t^3}{3!} \frac{\omega_0}{H_i} \frac{I_{qi}}{T_{d0i}} \end{bmatrix}$$

选定误差权矩阵 $Q = \text{diag}[q_1, q_2, q_3]$ 及控制权 $R = \text{diag}[r]$, 则根据上述各式可求得非线性励磁预测控制规律为

$$U(t) = -[[A(\Delta t) \Omega(X(t))]^T Q A(\Delta t) \Omega(X(t)) + R]^{-1} * \quad (4.49)$$

$$[[A(\Delta t) \Omega(X(t))]^T Q [I_\Delta(t) + \Psi(X(t), \Delta t) - F(X_r, \Delta t)] - R U_f^*]$$

4.5 仿真比较考察

为了考察所设计的基于 TSE 的非线性励磁预测控制及基于 TSE 的改进设计方案的有效性, 我们在安德森 3 机系统的模型上将上述两种方法与基于差分方程的设计方案分别进行了仿真比较考察。

考虑安德森 3 机 9 节点系统, 系统结构如图 4-1 所示, 发电机参数如表 4-1、表 4-2 所示。在不考虑发电机的凸极效应, 即认为 $x_q = x'_d$ 时, 系统的正常运行状态如表 2 所示。在仿真研究中, 各负荷用等值阻抗模拟, 并假设各发电机的机械功率在暂态过程中保持不变, 即 $P_{mi} = P_{mi0}$

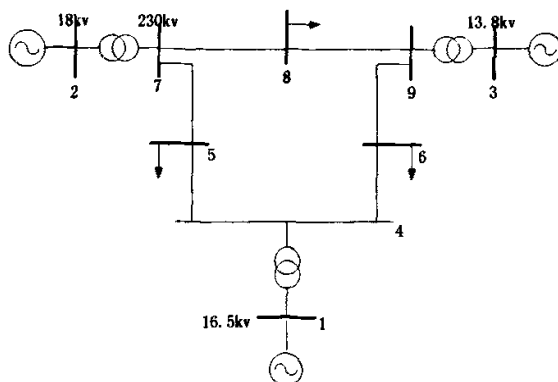


图 4-1 安德森 3 机系统的结构图

Fig.4-1 Andersen power system

发电机	X_d / pu	X'_d / pu	R / pu	H / s	T'_{d0} / s	D / pu
1	0.1460	0.0608	0.000	47.28	8.96	1.00
2	0.8958	0.1198	0.000	12.80	6.00	1.00
3	1.3125	0.1813	0.000	6.02	5.89	1.00

表 4-1 发电机参数

Tab.4-1 Parameters of generator

发电机	$P_{m(0)} / pu$	$E'_{q(0)} / pu$	$\delta_{(0)} / rad$	$\omega_{(0)} / (rad \cdot s^{-1})$
1	0.71641	1.05664	0.039647	376.99
2	1.63000	1.05020	0.344382	376.99
3	0.85000	1.01697	0.229798	379.66

表 4-2 系统的初始运行状态

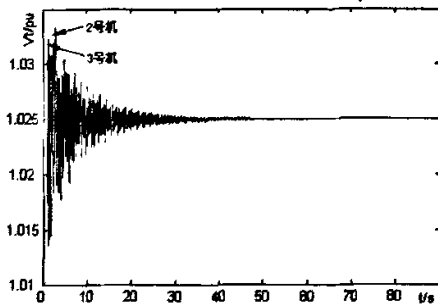
Tab.4-2 Initial operation state of the system

4.5.1 有功功率调节扰动考察

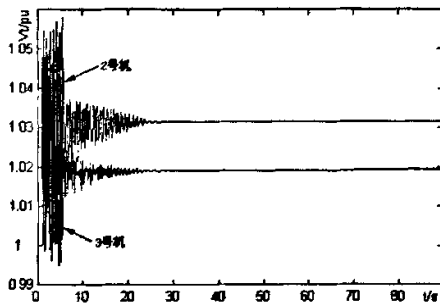
在1秒时，将2号机组发电机有功功率标幺值由1.63000调节为1.37893，将3号机组发电机有功功率标幺值由0.85000调节为1.1。

安德森3机系统在基于TSE的非线性励磁预测控制规律（控制规律1）的控制下的 V_t 响应曲线如图4-2-a所示，在基于非线性差分的控制规律（控制规律2）

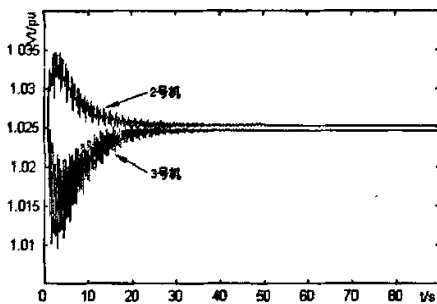
控制下的 V_t 响应曲线如图4-2-b所示, 在基于TSE的改进设计(控制规律3)的控制下的 V_t 响应曲线如图4-2-c所示。



(a) TSE 控制规律



(b) 差分控制规律



(c) TSE 改进设计控制规律

图 4-2 2#机与 3#机端电压响应曲线

Fig.4-2 Responses of terminal voltage of 2[#] and 3[#] generators

由图 4-2-a, 4-2-b, 4-2-c 可以看出, 无论是 2 号机还是 3 号机在机械功率调节扰动时, 控制规律 2 作用下的发电机机端电压产生了静态偏移, 而在控制规律 1 和控制规律 3 的作用下发电机端电压能够准确跟踪其给定值, 且收敛速度较快。

同理, 在基于 TSE 的非线性励磁预测控制规律(控制规律 1)的控制下的 P_e 响应曲线如图 4-3-a 所示, 在基于非线性差分的控制规律的(控制规律 2)控制下的 P_e 响应曲线如图 4-3-b 所示, 在基于 TSE 的改进设计(控制规律 3)的控制下的 P_e 响应曲线如图 4-3-c 所示。由图可知, 控制规律 2 作用下的发电机有功功率摆动平息较快, 而在控制规律 1 和控制规律 3 作用下发电机有功功率摆动

平息效果相当。

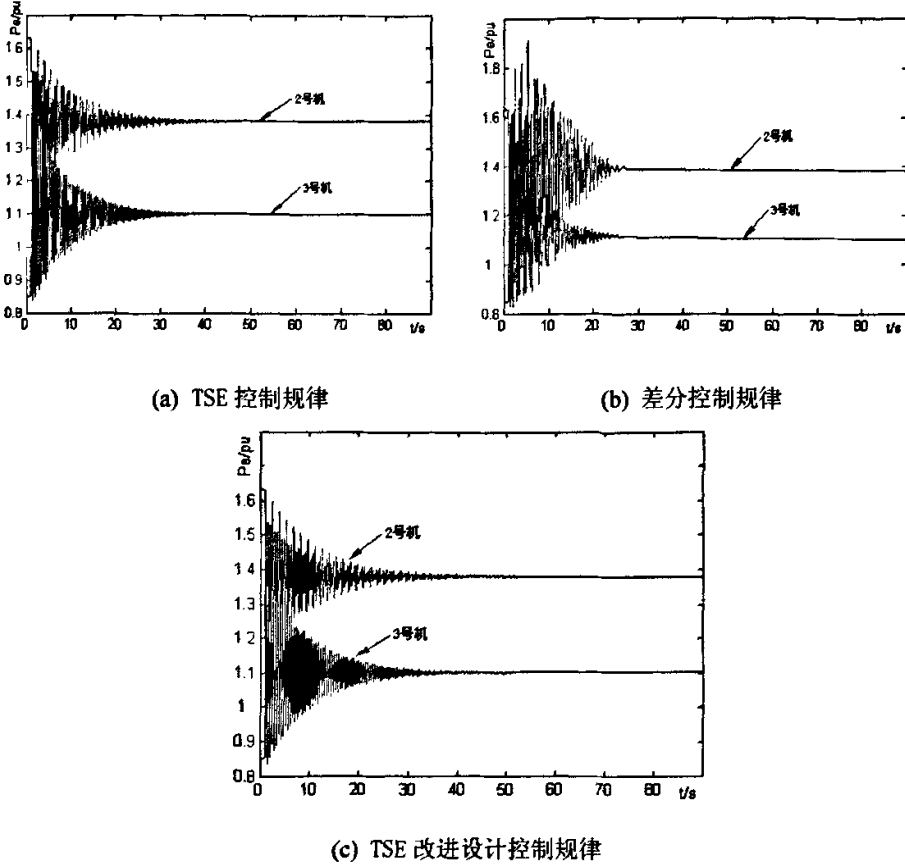


图 4-3 2# 机与 3# 机有功功率响应曲线

Fig.4-3 Responses of active power of 2[#] and 3[#] generators

发电机角速度 ω 在基于TSE的非线性励磁预测控制规律（控制规律1）的控制下响应曲线如图4-4-a所示，在基于非线性差分的控制规律的（控制规律2）控制下的响应曲线如图4-4-b所示，在基于TSE的改进设计（控制规律3）的控制下的响应曲线如图4-4-c所示。由图可以看出，在控制规律2的作用下2号机和3号机在控制规律2作用下的 ω 的摆动幅度较大且产生了较大的偏移量，控制效果不能令人满意，而在控制规律1和控制规律3的作用下 ω 收敛速度较快，同时偏移量较小，效果较好。

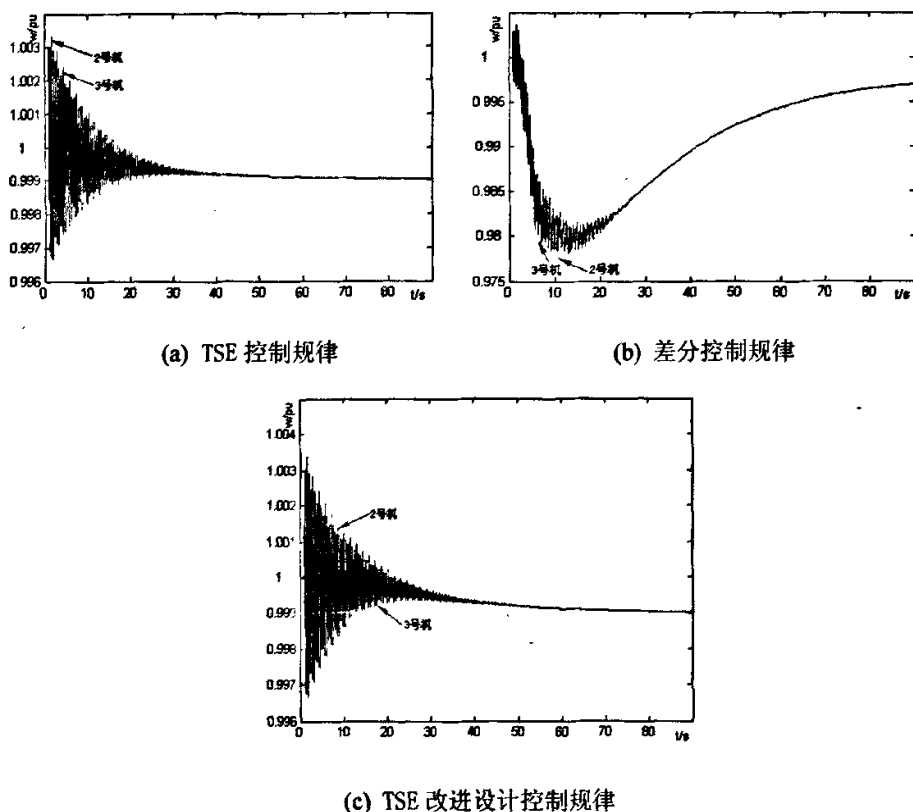


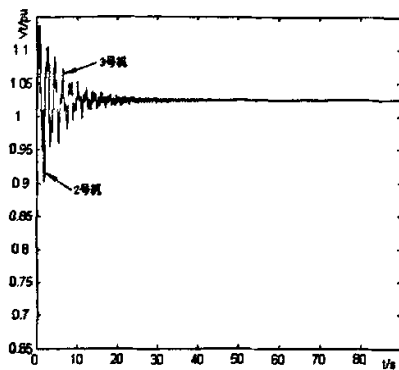
图 4-4 2# 机与 3# 机角速度响应曲线

Fig.4-4 Responses of rotor angular speed of 2[#] and 3[#] generators

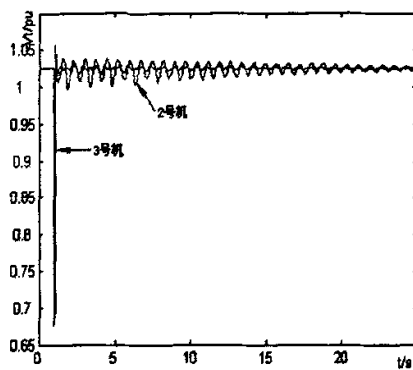
4.5.2 三相短路扰动考察

将安德森3机系统在1秒时发生三相短路，1.1秒时切除故障并重合闸，在基于TSE的非线性励磁预测控制（控制规律1）、非线性差分控制（控制规律2）和在基于TSE的改进设计（控制规律3）的控制下进行仿真比较考查。

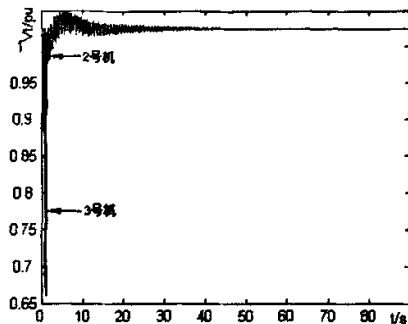
在控制规律 1 和控制规律 3 的控制下的 V_f 响应曲线如图 4-5-a、4-5-c 所示，由图可知发电机端电压在发生短路故障后能够准确跟踪其给定值，且收敛速度较快，同时超调量也较小，而且控制规律 3 的控制效果更优于控制规律 1，超调量更小。而在控制规律 2 控制下的 V_f 响应曲线如图 4-5-b 所示，发电机机端电压的波动幅度大，恢复到稳定状态所需的时间长，效果较差。



(a) TSE 控制规律



(b) 差分控制规律

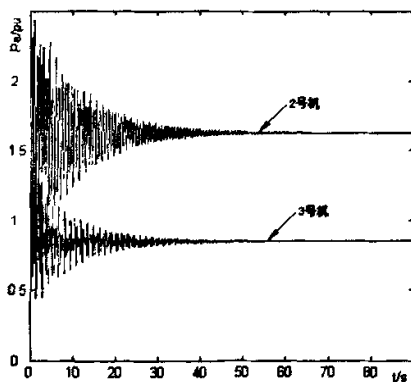


(c) TSE 改进设计控制规律

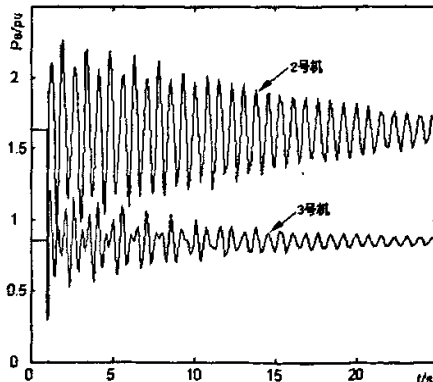
图 4-5 2#机与 3#机端电压响应曲线

Fig.4-5 Responses of terminal voltage of 2[#] and 3[#] generators

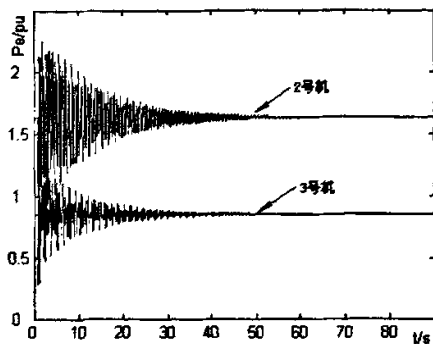
各发电机的有功功率 P_e 响应曲线如图 4-6 所示。



(a) TSE 控制规律



(b) 差分控制规律



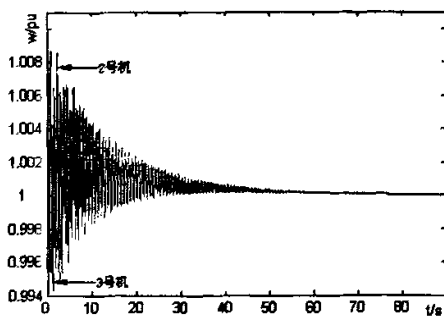
(c) TSE 改进设计控制规律

图 4-6 2# 机与 3# 机有功功率响应曲线

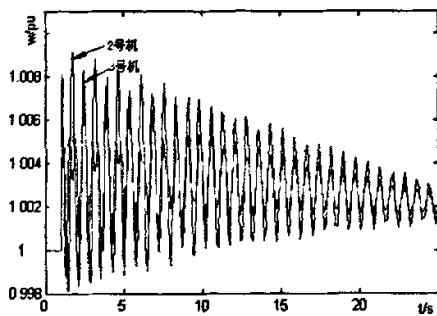
Fig.4-6 Responses of active power of 2[#] and 3[#] generators

根据仿真结果可知,发电机的有功功率 P_e 在控制规律 1 和控制规律 3 的控制下响应曲线如图 4-6-a, 4-6-c 所示,在控制规律 2 的控制下 P_e 响应曲线如图 4-6-b 所示。由图可知,无论是 2 号机还是 3 号机在重合闸扰动时,各控制规律的控制效果相当。

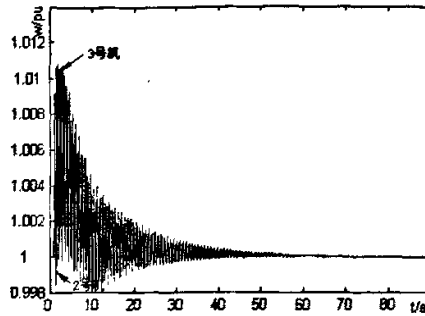
同样,在控制规律 1 和控制规律 3 的控制下的 ω 响应曲线如图 4-7-a、4-7-c 所示,在控制规律 2 的控制下 ω 的响应曲线如图 4-6-b 所示。由图可以看出,在重合闸扰动时,各控制规律的控制效果没有实质上的差别。



(a) TSE 控制规律



(b) 差分控制规律



(c) TSE 改进设计控制规律

图 4-7 2# 机与 3# 机角速度响应曲线

Fig.4-7 Responses of rotor angular speed of 2[#] and 3[#] generators

总结：通过机械功率扰动和三相短路仿真，我们综合考察了在两种扰动下发电机机端电压，有功功率，角速度响应曲线，从仿真效果来看，虽然这 3 种控制规律在有功功率和角速度的控制上效果相当，但是基于 TSE 的控制规律设计与基于 TSE 的改进设计对于机端电压的控制效果明显优于基于差分的控制规律，而且基于 TSE 改进设计的控制效果略胜于基于 TSE 的控制规律设计。

4.6 小结

本章内容是本论文的重点也是难点，我们在此详细介绍了多机电力系统数学模型的推导过程，并将该模型与预测控制理论相结合得到了 3 种非线性预测控制规律：基于差分的非线性励磁预测控制、基于 TSE 的非线性励磁预测控制和基于 TSE 的改进设计。为了验证所设计的控制规律的控制效果，本文以安德森 3 机系统为仿真对象进行了仿真比较考察，得出了基于 TSE 的改进设计优于基于 TSE 的非线性励磁预测控制设计，更优于基于差分的非线性励磁预测控制设计的结论。

第5章 结束语

本文根据电力系统非线性特点,将预测控制理论应用于单机无穷大系统和多机电力系统的励磁控制,并对其进行理论分析、非线性励磁控制器设计、MATLAB离线仿真研究。

对于单机无穷大系统,本文提出了一种基于TSE的改进设计,并将该设计与基于TSE的非线性控制规律,线性最优控制规律进行仿真比较,得到了较好的控制效果。

对于多机电力系统,本文提出的基于TSE的非线性励磁控制规律具有以下特点:

1、控制规律是分散解耦的,即第 i 台发电机励磁控制量 u_i 只与该台发电机本身的输出量:有功功率 P_{ei} 、无功功率 Q_{ei} 、机端电压 V_{di} 和转速 ω_i 有关,而与其他机组的状态量或输出量无直接关系。

2、控制规律独立于输电网参数,即第 i 台机组的控制量只与本台机组参数:转动惯量 H_i ,转子绕组时间常数 T_{d0i} , d 轴电抗 x_{di} 及 d 轴暂态电抗 x'_{di} 有关,其中不显含输电网参数。这就使得按照这种控制规律设计的控制器,对网络参数及网络结构的改变,有完全的适应能力,提高了系统的鲁棒性。

3、对电力系统大干扰稳定性的改善。由于这种预测控制器是在电力系统非线性数学模型基础上进行设计的,所以能适应系统状态的大范围变化,并且,权矩阵 Q 的选择具有随意性,预测步长 Δt 也可变化,为某一状态寻找一个最优的预测步长。故而,这种励磁控制器能在更大程度上改善系统对大干扰的稳定性。

4、控制规律易于实现。在控制规律中,发电机参数由制造厂家提供;网络等值参数由调度部门给出;状态或输出变量和关联项可在当地实时测得;对于控制器来说,有功功率 P_e 、转速 ω 和机端电压 V_i 都是易测得的量,权矩阵 Q 和 R 以及预测步长在设计控制器时根据网络情况确定。

5、对发电机端电压的改善情况。由于本文的数学模型中的状态量的选取为 $[V_n, P_{ei}, \omega_i]$,其中含有机端电压 V_i ,所以可以很好的观测机端电压 V_i 的变化情况并对其进行控制,也能改善功角稳定,这是传统的控制器所无法比拟的。

6、物理概念清晰。非线性预测控制理论在电力系统中的应用具有明确的物理概念，避免了由其它非线性控制理论所产生的没有明确物理意义的变量和工程技术人员难以理解的虚拟控制量等概念。

最后，问题与展望。在本文中所设计的预测控制规律在与预测控制理论结合的过程中，仅仅是对单步预测理论的简单运用，而预测控制理论中多步预测理论的独特优势并未得到真正体现。而要实现多步预测与多机系统的完美结合仍需要进行大量的研究工作。

参考文献

- [1] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制. 北京: 科学出版社, 1993.
- [2] 席裕庚. 预测控制. 北京: 国防大学出版社, 1993.
- [3] 舒迪前. 预测控制系统及其应用. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [4] 李国勇. 智能控制及其 MATLAB 实现. 北京: 电子工业出版社, 2005
- [5] 李啸骢, 颜卓胜, 韦化, 王辑祥. U 型非线性抗扰励磁控制律设计. 中国电机工程学报, 1999. 19(9): 71~75.
- [6] 李啸骢, 程时杰, 韦化, 王少荣. 非线性励磁控制中输出函数对系统性能的影响. 电力系统自动化, 2003. 27(5): 6~11.
- [7] 李啸骢, 程时杰, 韦化, 王少荣. 具有多性能指标的汽轮发电机非线性综合控制. 中国电机工程学报, 2003. 23(4): 96~101.
- [8] 李书臣, 徐心和, 李平. 预测控制最新算法综述. 系统仿真学报, 2004. 16(6): 1314~1319
- [9] V. Rajkumar. R. R. Mohler. Nonlinear Predictive Control for the Damping of Multimachine Power System Transients using FACTS Devices. IEEE PES. Conference Proceeding on 1994 Power Engineering Society Summer Meeting.
- [10] Zhishan Liang. Huaguang Zhang. Hongyue Wang. Hongzhan Nie. Holographic robust predictive control of synchronous machine excitation for power systems. IEEE PES. Conference Proceedings on 2000 Power Engineering Society Winner Meeting.
- [11] Chian-Chuang Ding. King-Tan Lee. Chee-Ming Tsai. Tsong-Liang Huang. Optimal Design for Power System Dynamic Stabilizer by Grey Prediction PID Control. IEEE PES. Conference Proceedings on 2002 Power Engineering Society Winner Meeting.
- [12] Lei Qingsheng. Li Guangxi. Chen yongping. Real-time Prediction and Control for Transient Stability of Multi-machine Power System. IEEE PES. Conference Proceedings on 1998 Power Engineering Society Summer Meeting.
- [13] A. Molina. A. Gabaldon. J. A. Fuentes. Fco. J. Canovas. Approach to multivariable predictive control applications in residential HVAC direct load control. IEEE PES. Conference Proceeding on 2000 Power Engineering Society Summer Meeting.
- [14] 刘辉, 李啸骢, 韦化. 一种基于 MAC 的非线性预测励磁控制器的设计. 继电器, 2005. 33(8): 1~5
- [15] 李啸骢, 程时杰, 韦化, 等. 一种高性能的非线性励磁控制. 中国电机工程学报, 2003. 23(12): 37~42

- [16] 李兴源, 王贵德, 刘俊勇. 稳定控制研究中的多机电力系统数学模型. 电力系统自动化, 1994. 18 (5): 20~25
- [17] 张新莲, 李哲生. 用频域法建立多机电力系统数学模型. 黑龙江电力技术, 1996. 18 (2): 65~69
- [18] 谢小荣, 韩英铎, 崔文进, 唐义良. 多机电力系统中发电机励磁控制设计的数学模型分析. 中国电机工程学报, 2001. 21 (9): 8~12
- [19] 刘国贤, 林宪枢, 杨奇逊. 基于能量函数的多机系统暂态过程励磁控制研究. 中国电机工程学报, 1997. 17(4): 264~268
- [20] 周雪松, 马幼捷, 卢强, 高景德. 非线性励磁控制对发电机进相运行稳定性的改善. 清华大学学报, 1996. 36. (9): 9~13
- [21] 孙元章, 黎雄, 戴和平, 卢强. 同时改善稳定性和电压精度的非线性励磁控制器. 中国电机工程学报, 1996. 16. (5): 332~336
- [22] 万秋兰, 单渊达. 多机电力系统发电机的同步稳定特性分析. 电力系统自动化, 2005. 29. (12): 15~18
- [23] 睢刚, 韦红旗, 陈绍炳, 徐治皋. 预测控制在单元机组负荷控制中的应用. 动力工程, 2003. 23. (2): 2317~2320
- [24] 凌呼君, 王文兰, 冯永祥. 广义预测控制在火电厂单元机组协调控制中的研究. 浙江电力, 2003. 5: 1~4
- [25] 蒋铁铮, 陈陈, 曹国云. 同步发电机励磁非线性预测控制技术. 控制与决策, 2005. 20. (4): 467~470
- [26] 席裕庚. 关于预测控制的进一步思考. 控制理论与应用, 2003. 11. (2): 219~221
- [27] 陈虹, 刘志远, 解小华. 非线性模型预测控制的现状与问题. 控制与决策, 2001. 16. (4): 385~389
- [28] 黄健, 涂光瑜, 陈德树. 发电机非线性综合控制. 电网技术, 1997. 21. (3): 5~9
- [29] 林永君, 高峰, 王兵树, 印建平. 一种新型非线性预测控制算法. 控制工程, 2003. 10: 129~131
- [30] 梁志珊, 张化光, 王红月, 聂宏展. 同步发电机励磁非线性预测控制. 中国电机工程学报, 2000. 20(12): 52~54.
- [31] 睢刚, 韦红旗, 陈绍炳, 徐治皋. 单元机组负荷多变量模型预测控制. 中国电机工程学报, 2002. 22 (4): 144~148
- [32] 李国庆. 电力系统暂态稳定预测控制的研究. 电力系统自动化. 1994. 18 (3): 25~31
- [33] 侯国莲, 刘洋, 张建华. 预测函数控制在火电厂单元机组协调控制系统中的应用. 中国动力工程学报, 2005. 25 (2): 239~243
- [34] 王国良, 孙鹤旭, 李练兵. 广义预测在永磁同步电动机控制中的应用. 控制理论与应用, 2004. 23 (5): 5~7

- [35] 胡兆庆, 毛承雄, 陆继明. 基于灰色预测的发电机励磁控制系统. 电力系统及其自动化学报, 2002. 14 (1): 30~33
- [36] 萧志云, 凌呼君. 大型单元机组实现协调预测控制的研究. 基础自动化, 2001. 8(4): 58~61.
- [37] Q. Lu, Y. Sun. Nonlinear-stabilizing control of multi-machine systems. IEEE Trans on Power Systems. 1989. 4(1): 236~241
- [38] 潘云江, 常鲜戎, 赵书强, 万军, 徐开理. 多机系统积分型线性综合最优控制规律的研究. 电网技术, 1999. 23(11): 36~39
- [39] 晋清祥, 李秀梅. 多机电力系统的非线性PID励磁控制. 黑龙江电力技术, 1988. 20 (2): 70~77
- [40] 李崇坚, 郭国晓, 高龙, 李发海. 电力系统非线性PID励磁控制器. 清华大学学报(自然科学版), 2000. 40(3): 48~51
- [41] 黄湘云, 朱学峰. 预测控制的研究现状与展望. 石油化工自动化, 2005. 2: 27~31
- [42] 苏宏业, 李林欢, 褚健. 预测控制的新进展. 机电工程, 2001. 18(5): 4~8
- [43] 胡国龙, 孙优贤. 预测控制进展及其应用研究. 电力系统及其自动化学报, 2003. 15(1): 109~114
- [44] 王斌, 陈兵. 多目标非线性励磁控制器的设计. 湖南工程学院学报, 2005. 15(3): 11~15
- [45] 马培蓓, 吴进华, 纪军, 徐新林. dSPACE实时仿真平台软件环境及应用. 系统仿真学报, 2004. 16(4): 667~670
- [46] 陈启军, 王月娟, 陈辉堂. 基于dSPACE 并行处理平台的机器人实时仿真系统结构及实现. 机器人, 2003. 25 (1): 62~65
- [47] 陈静, 邹洁. 基于dSPACE的温度预测控制仿真试验研究. 武汉理工大学学报, 2006. 28(6): 107~109

致 谢

在攻读硕士学位及作论文期间，我得到了导师李啸骢教授的谆谆教导。本文的工作自始至终都是在李老师的精心指导和全力帮助下完成的，导师的思维方式以及严谨的治学观念使我深深受益，在此向导师表示衷心的感谢。

感谢刘辉博士给予我的热心帮助，通过和他进行学术探讨，我受益匪浅，在研究课题的道路上少走了很多弯路，争取了宝贵的时间。

另外，我要感谢各位同门师兄对我的关心和帮助，感谢广西大学电气工程学院给我提供了良好的学习环境，使我在这里度过了难忘的研究生生活。

最后，深深的感谢父母一直以来给我的无私的爱，是他们在精神和物质上给予我的关爱和支持不断激励我前进；感谢我的爱人，是他在我面对困难，徘徊不前时不断的鼓励我，给我信心。家人的爱将永远陪伴我迎接今后的学习和生活。

声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其它个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名：_____ 日 期：_____

在学期间发表的学术论文与研究成果

- [1] 牛方方, 李啸骢, 欧阳英明. 多机电力系统中基于目标状态方程的非线性励磁预测控制研究. 郑州轻工业学院学报. 已录用