

# 先进控制理论在同步发电机调速控制系统中的应用

黄乙晋<sup>1</sup> 陈 钊<sup>2</sup>

(1. 华电四川发电有限公司攀枝花分公司, 四川 攀枝花 617065;

2. 四川省电力工业调整试验所, 四川 成都 610072)

**摘要:** 发电机调速控制由于在电力系统稳定中所起的重要作用, 一直以来都是众多电力科研工作研究热点。近年来, 随着控制理论的快速发展, 发电机调速控制也进入了一个新的局面, 几乎所有的先进控制理论均被应用到同步发电机控制系统中, 但目前实际工程仍以传统控制方式为主。秉着理清思路、抓住重点、明确方向的目的, 对多种先进控制方法在同步发电机控制系统中的应用情况进行了剖析, 总结现有成果及问题, 同时对未来进行了展望。

**关键词:** 调速控制; 综合控制; 先进控制理论; 发电机

**Abstract:** Excitation and governor control are always the hot points in electric power research because of their significant effects in the stability of power system. With the rapid development of control theory, excitation and governor control has entered a new situation in recent years. Almost all of the advanced control theories are applied to control system of synchronous generator, but the traditional control is still most widely used in real project. In order to clear the thoughts, grasp the main points and clarify the direction, kinds of advanced control theories used in control system of synchronous generator are analyzed, the achievement and problems are summarized, and the future prospects are forecasted.

**Key words:** governor control; integrated control; advanced control theory; generator

中图分类号: TM621 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)03-0090-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.03.021

## 0 引言

随着电力系统的逐步扩大和发电机单机容量的迅速增加, 保证系统运行的可靠性和稳定性, 提供合格的电能质量和良好的动态品质具有极其重要的意义。发电机组的励磁控制和调速控制是改善电力系统稳定运行的有效措施。随着现代控制理论的发展和完善, 许多科技工作者进行了大量的研究工作, 将各种先进控制理论如反馈线性化、鲁棒控制、最优变目标、自适应控制、变结构控制、智能控制等用于改进和发展发电机控制系统<sup>[1]</sup>。重点介绍上述先进控制理论方法在同步发电机调速及励磁调速综合控制系统中的研究情况, 并分析了各种先进控制理论的优缺点、适用范围及推广应用可行性, 谨供广大电力科研人员参考。

## 1 控制理论的发展<sup>[1]</sup>

控制理论的发展经历了古典控制、现代控制

(包括线性最优控制) 和非线性控制几个发展阶段, 特别是近十几年来非线性控制理论的飞速发展, 为研究和解决电力系统问题提供了新的理论基础。然而, 认识的发展是无止境的。工程技术人员总是在不断地寻找更加直观、简明、有效的理论和方法。近20年来, 非线性系统控制理论在电力系统的应用得到了大量的研究。按方法主要分为: 基于微分几何理论的反馈线性化方法、直接反馈线性化方法、基于Lyapunov稳定性理论的控制方法、非线性变结构控制(滑动模态控制)方法和非线性自适应控制等。

### 1.1 反馈线性化方法

反馈线性化方法是非线性系统控制理论的一种有效方法, 包括基于微分几何理论的输入对状态反馈线性化、输入输出线性化、直接反馈线性化(DFL)方法和逆系统方法等。

#### 1.1.1 基于微分几何理论的反馈线性化方法

对于式(1)所表示的单输入单输出的仿射非线性控制系统

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $x \in R^n$  为状态向量;  $u$  为控制量;  $y$  是系统输出;  $f(x)$ 、 $g(x)$  和  $h(x)$  是  $R^n$  上的光滑向量场。

基于微分几何理论的反馈线性化方法主要有2种方法: 输入对状态反馈线性化和输入输出线性化。前者主要用于研究非线性系统的正定(stabilization)问题, 后者用于研究系统的跟踪(track)和调节(regulation)问题。在系统满足一定的条件下, 这两种方法可以互相转化。

### 1) 输入对状态反馈线性化

若非线性系统(1)能被输入对状态反馈线性化, 则在一个邻域中存在一个微分同胚  $T: \Omega \rightarrow R^n$ , 在新的坐标变量  $z = T(x)$  下, 系统(1)变换为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \vdots \\ \dot{z}_n = \alpha(x) + \beta(x)u \end{cases} \quad (2)$$

并通过一个非线性反馈控制规律得

$$u = \beta^{-1}(x) (-\alpha(x) + v) \quad (3)$$

在新的控制  $v$  下, 系统(1)可精确转化为一线性系统为

$$\dot{z} = Az + Bv \quad (4)$$

对于线性系统(4), 可用各种成熟的线性系统控制方法来设计它的控制  $v$ , 比如线性最优控制理论、极点配置等。这种方法的特点是: ①状态线性化是通过一个状态变换  $z = T(x)$  和输入变换(非线性反馈控制规律(3))得到的, 需要用到系统所有的状态变量; ②新的状态变量  $z$  必须可以得到。如果没有直接的物理意义或者不可测量, 则需要原来的状态变量  $x$  来计算  $z$ ; ③控制规律需要系统的精确模型, 理论上不具备对参数和模型不精确性的鲁棒性。

### 2) 输入输出线性化

非线性系统(1)在  $x_0 \in R^n$  具有相对度(relative degree)  $r, r \leq n$ , 是指存在  $x_0$  的一个邻域  $\Omega$

$$L_g^k L_f^r h(x) = 0 \quad \forall x \in \Omega \quad 0 \leq k \leq r-2$$

$$L_g L_f^{r-1} h(x) \neq 0 \quad \forall x \in \Omega$$

输入输出线性化的方法是通过输出对时间微分  $r$  次, 直至控制  $u$  显式出现。  $y$  的  $r$  次微分为

$$\frac{d^r y}{dt^r} = \alpha(x) + \beta(x)u \quad (5)$$

其中  $\alpha(x) = L_f^r h(x)$ ;  $\beta(x) = L_g L_f^{r-1} h(x)$

当  $\beta(x) \neq 0$ , 通过非线性反馈控制得

$$u = \beta^{-1}(x) (-\alpha(x) + v) \quad (6)$$

得到  $r$  阶线性系统为

$$\frac{d^r y}{dt^r} = v \quad (7)$$

当  $r = n$  时, 输入输出线性化同输入对状态线性化等价。当  $r < n$  时, 系统(1)只能部分线性化。余下的  $(n-r)$  阶系统成为系统的内部动态, 可以用零动态方法加以分析。这种方法具有以下特点: ①不需要状态变换, 只需要输出的  $r$  阶微分; ②控制规律需要系统的精确模型和状态来实现。

### 1.1.2 直接反馈线性化方法

对由式(8)描述的非线性系统

$$\dot{x}^{(n)} = f(x, x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(n-1)}, \mu, t) \quad (8)$$

其中  $x^{(i)} (i = 0, 1, \dots, n-1)$  是状态变量;  $u$  是控制变量。

定义

$$v = f(x, x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(n-1)}, \mu, t) \quad (9)$$

如果函数  $f: u \rightarrow v$  的逆函数存在且有唯一的解析解有

$$u = f^{-1}(x^{(i)}, \mu, t) \quad i = 0, 1, \dots, n-1$$

则可以通过非线性的反馈控制  $u$  将非线性系统(8)线性化成一个线性系统  $\dot{x}^{(n)} = v$ 。可以看出, 直接反馈线性化方法可以看做是输入输出线性化的一个特例。它不需要进行复杂的数学推导和坐标变换, 在工程应用上有一定的优越性。这种方法在电力系统的非线性控制中得到了大量的研究, 是一个主要的研究方向。

### 1.2 非线性变结构控制

变结构控制在电力系统的非线性控制中很早得到了应用, 比如早期的 Bang-Bang 控制。这种控制主要有两种形式: 一种是在微分几何方法的基础上, 对线性系统(4)采用线性变结构控制, 这一类方法仍然需要非线性控制反馈规律, 没有充分地利用变结构控制对参数的鲁棒性; 另一种方法是在非线性系统模型上直接设计变结构控制规律。

变结构控制方法(滑动模态控制)是一种有效的非线性控制方法。它具有如下的一些优点: 1) 控制系统的响应不依赖系统结构和参数; 2) 理论上可以应用到所有类型的非线性系统; 3) 对比于其他的非线性控制方法, 容易实现; 4) 对参数不确定性和外部扰动具有很好的鲁棒性。当然, 它也存在一些缺点, 例如控制规律中存在的高频抖动。近年来, 采用饱和的切换函数替换理想的切换函数等方法使这一问题得到了一定程度的解决。在变结构控

制系统中,控制规律是一个根据在状态空间中定义的超平面上切换的非连续的函数。控制规律迫使处于任何初始条件下的系统状态按一定的趋近率到达并保留在该超平面上,在超平面上系统的动态成为滑动模态。

### 1.3 Lyapunov 直接控制方法

传统上,应用 Lyapunov 直接控制方法估计电力系统的稳定域并进行实时的动态安全估计。但它也是一种设计非线性系统控制规律的有效方法。对式(10)描述的非线性系统有

$$\dot{x} = f(x) \quad (10)$$

如果  $f(\hat{x}) = 0$ , 则  $(\hat{x})$  是系统的一个平衡点。

Lyapunov 直接控制方法通过寻找一个适当的 Lyapunov 函数  $V(x)$ ,  $V(x)$  是定义在状态空间上的正定标量函数并且在平衡点  $\hat{x}$  有最小值。如果  $\dot{V}(x) = \frac{\partial V}{\partial x} f(x) \leq 0$ , 则系统在  $\hat{x}$  处是稳定的。如果  $\dot{V}(x) = \frac{\partial V}{\partial x} f(x) < 0$ , 则系统在  $\hat{x}$  处是渐近稳定的。 $\dot{V}(x)$  取负值表明  $V(x)$  随着时间递减到它的最小值。由于  $V(x)$  在平衡点有最小值,  $x(t)$  最后收敛于平衡点  $\hat{x}$ 。 $V(x)$  的负值越大,  $x(t)$  收敛得越快。Lyapunov 最优控制规律定义为: 在所有时刻使  $\dot{V}(x)$  取得最大负值的控制规律。用 Lyapunov 直接控制方法设计控制规律可以分如下 3 步: 1) 找到系统的一个合适的 Lyapunov 函数; 2) 选择使得  $\dot{V}(x)$  在所有的系统轨迹上取得最大负值的控制规律; 3) 选择本地变量实现控制规律。

## 2 先进控制理论在调速控制中的应用

调速系统是一个集机械、电气为一体的复杂闭环自动调节控制系统,从控制的角度看,调速系统是一个典型的高阶、时变、非最小相位、参数随工况点改变而变化的非线性的复杂系统。

### 2.1 先进控制理论在水轮机调速系统中的应用

水轮机水门调节是一个复杂的水、机、电过程。由于引水系统的水锤效应及水轮机组的较大惯性,使得水轮机调节器设计十分困难。PID 控制是水轮机调速器设计中使用最广泛、最成熟的一种。但是同传统励磁调节器一样,水轮机 PID 控制受限于线性化控制理论,通常只有空载和负载两组参数,没有

充分考虑对象固有的非线性特征,常规的 PID 控制很难保证水轮机调节中获得所有工况的最佳调节,甚至可能在某些工况下还会出现不稳定现象。

由于鲁棒控制理论在解决系统的非线性和不确定性方面具有良好的效果,其在水轮机调速系统控制中也有较广的应用。文献[2]基于非线性微分几何控制理论和非线性  $H_\infty$  控制理论给出了针对具有刚性水锤效应的水轮发电机组的鲁棒控制规律。除此之外,自适应控制<sup>[3-4]</sup>、变结构控制<sup>[5-7]</sup>和预测控制<sup>[7]</sup>等在水电机组调节中也都得到了应用,但大多缺乏工程应用的实例。上述非线性控制方法对于水轮机时间常数  $T_w$  所存在的问题的研究较少,水轮机调速系统中的水门开度也是有一定范围的,即存在着饱和和限幅特性,现有非线性控制研究较少考虑这些方面。

由于处理非光滑非线性时变参数系统的控制问题具有良好的控制效果,智能控制在水轮机调速系统控制中也有着广泛的研究。文献[9]在对水轮机调节对象模型特性做出分析的基础上对采用模糊控制规则和算法进行了研究,通过计算机仿真证明了模糊调速控制系统有较快的收敛性和强的鲁棒性,虽然在模糊控制的基础上考虑了引入积分控制作用,但仍难克服稳态偏差。文献[10]在文献[9]的基础上提出模糊 PID 控制的策略,结果表明,此种控制方式可以集中模糊控制和 PID 控制的优点,从而使水轮机调速系统具有更优良的动态品质。

模糊控制本身具有一定的鲁棒性,但仍然难以适应大范围调节的要求,需要对控制规律和参数进行不断调整。同时,与常规控制理论相比,模糊控制技术还不完善,主要问题是如何提高模糊控制的控制品质(如稳态误差和超调等),以及如何提高学习能力。

在神经网络控制方面,文献[11]以水轮机调速系统为研究对象,对自适应神经元智能控制器进行了实验研究,结果表明神经网络控制可直接应用于工程实际。文献[12]应用神经网络的学习、映射和综合能力来研究水电机组的优化与自适应控制问题,较好地解决了稳定性较差的贯流式水轮发电机组的调节问题。

目前,国内已有部分水电控制专家正着手开发既能有效处理模糊知识又能有效学习的模糊与神经网络集成技术。文献[13]提出了一种智能模糊控

制系统,它充分利用水轮机调速器的现有硬件资源,在进行智能模糊实时控制的同时,以神经网络完成对水轮机调速系统的模拟和学习,解决了以往控制学习时由于模型未知而无法求反向传播误差的问题,为水力发电过程智能控制提供新的解决途径。

### 2.2 先进控制理论在汽轮发电机调速系统中应用

70年代以来,汽轮发电机快速电液调速系统不断完善和改进,使汽门关闭和开启速度有了很大提高,快控汽门技术日益受到人们的重视。鲁棒控制、自适应控制、反馈线性化控制、变结构控制、人工智能等方法在汽门控制领域都有应用。文献[14]用大范围线性化方法将非线性系统转化为线性系统,然后利用线性系统的李雅普诺夫函数方法对线性化后的系统进行设计,避免了构造非线性系统李雅普诺夫函数的困难,获得的汽门控制器解耦控制规律。文献[15]用反馈线性化技术将非线性系统转化为线性系统,然后用线性最优控制理论对其进行了设计,设计了两个控制器,一个用于小扰动,一个用于大扰动,二者结构相同,参数不同,二者共同作用得到总的汽门连续控制信号。文献[16-18]分别用LQ/H $\infty$ 控制、非线性变结构控制、模糊变结构控制对汽门控制进行设计。由于受到理论本身的局限性和电力系统复杂性的影响,基于上述理论的汽门快控技术有着与先进励磁控制相似的不足。

## 3 发电机励磁调速综合控制

传统控制方式下,发电机输出的有功功率、无功功率分别由调速系统与励磁系统控制,以保证发电机频率及机端电压的稳定。目前,这种独立控制方式已发展得较成熟,实际工程中也基本采用此种控制策略。但励磁、调速独立控制,各自对反馈量进行调节,不考虑发电机的耦合作用造成它们之间相互影响,在某些情况下不但不能使系统快速稳定,甚至会破坏系统稳定性。二者的综合控制被认为是改善电力系统稳定性及电能品质的有效措施,长期以来一直受到重视。目前大型发电机都配备了电液转换器和微机调速器,文献[19]认为,现代汽轮机调速系统对控制作用响应的快速性并不低于励磁系统,因而发电机励磁、调速系统综合控制是完全可行的。

文献[20-21]针对近似线性系统模型将自适应控制理论用于多机系统励磁和汽门的综合控制。文献[22]建立了适合于暂态稳定综合控制的数学

模型,并按照最大能量耗散原理推出了励磁和快关汽门综合非线性最优变目标控制规律,这种控制策略只需要获得局部信息,容易在线实现。文献[23]根据电力系统在受到大扰动时系统不失稳和故障后系统发电机端电压具有好的调节特性的要求,励磁控制器分两个时段考虑满足不同的要求,励磁控制器设计完成后,在汽门控制器的设计过程中,考虑励磁控制器的调节作用,得到相应的两个时段的汽门控制器。文献[24]运用非线性变结构理论,提出了汽轮发电机组综合控制器的设计方法,汽门控制的目标是改善功角稳定,励磁控制的目标是同时改善系统的功角稳定和发电机端电压的动态特性,得到的变结构综合控制规律与系统工作点无关,鲁棒性强。文献[25]基于逆系统的方法设计了汽轮发电机的综合控制器,将电力系统这一多变量、非线性、强耦合的复杂被控对象解耦成两个独立的SISO线性化积分型子系统,然后基于线性系统理论设计了综合控制器,在系统受到较大冲击进入暂态运行时,采用 $\alpha$ 阶逆系统控制方法,明显地增强了系统第一摆的稳定性。文献[26]先设计一个DFL的补偿器,然后将系统的耦合等作为扰动,进一步采取鲁棒控制方法设计了励磁和汽门开度的协调控制。

然而,发电机励磁、调速系统综合控制一直停留在理论研究阶段,难以用于工程实际,除了先进控制理论本身在工程实践中应用较困难外,还有文献认为,存在一系列机械动作的调速控制系统与完全不存在机械动作的励磁控制系统带宽差距较大,调速系统机械机构及其安全可靠运行的要求不允许系统过于快速、频繁地动作,因而,励磁、调速系统综合控制不能真正实现<sup>[27]</sup>。

## 4 存在的问题及展望

虽然先进控制理论在发电机调速及励磁调速综合控制中已取得不少成果,但要将其在具体工程中应用,还面临着如下问题:1)电力系统建模及等值问题。准确的模型及等值方法可以大幅度促进先进控制理论在电力系统中的发展应用。2)非线性问题。智能控制理论可以很好解决不可微非线性问题,但现有方法仍带有一定“试凑”性质,理论仍需深入、完善。

除此之外,基于先进控制理论设计的发电机控制器在响应速度、参数整定等方面的问题仍需进一步研究、解决。在取得显著成绩的同时,同步发电机控制

方法还需要进一步总结、提炼、深入、创新,只有综合解决好控制方法在理论与实践中的各种问题,才能将电力系统控制理论的研究推向一个新的高度。

### 5 总 结

为促进发电机控制理论研究和工程应用的进一步开展,并最终提高现代大型电力系统的安全运行稳定性,就近年来先进控制理论在同步发电机励磁、调速系统中的应用情况进行了全面的概括,同时阐明了这一研究领域的核心问题所在,并指出了进一步研究工作所面临的问题及本领域发展方向。

#### 参考文献

[1] 吴青华,蒋林. 非线性控制理论在电力系统中应用综述[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(3): 1-10.

[2] 孙郁松,邵宜祥. 水轮机调节系统非线性  $H_{\infty}$  控制规律的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 56-59.

[3] Scott C. Bonnert, L. Wozniak. Adaptive Speed Control of Hydro-generators by Recursive Least Squares Identification Algorithm [J]. IEEE Trans. On Energy Conversion, 1995, 10(1): 162-168.

[4] Jing Lei, Ye Luqing. An Intelligent Discontinuous Control Strategy for Hydroelectric Generating Unit [J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1999, 13(1): 84-89.

[5] Ye Luqing. Variable Structure Control and Its Applications to Hydroelectric Generating Unit [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1992(1): 28-38.

[6] Ye Luqing. Variable Structure and Time-varying Parameter Control for Hydroelectric Generating Unit [J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1989, 4(3): 293-299.

[7] Ye Luqing. An Intelligent Self-improving Control Strategy with a Variable Structure and Time-varying Parameters for Water Turbine [J]. La Houille Blanche, 1989(6): 463-475.

[8] Louis Wozniak, Daniel J. Bitz. Load-lever-sensitive Governor for Speed Control of Hydro-generators [J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1988, 3(1): 78-84.

[9] 李值鑫,陈启卷. 水轮机调节系统 FUZZY 控制研究[J]. 武汉水力电力学院学报, 1989, 22(5): 66-73.

[10] 蔡维由,邓世洪. 水轮机调节系统的 FUZZY-PID 复合控制[J]. 电气自动化, 1996, 18(4): 10-12.

[11] 陈捷,王宁. 水轮发电机组的智能同期控制[J]. 中国电机工程学报, 1994, 14(5): 33-37.

[12] 赵闻鹰,郭尚来. 基于人工神经网络的水轮发电机组调速系统[J]. 电气自动化, 1996(5): 8-9.

[13] 景雷,叶鲁卿,周泰经. 一种新型水轮发电机组智能

模糊控制系统[J]. 中国电机工程学报, 1994, 12(2): 28-30.

[14] 刘国贤,林宪枢,杨奇逊. 多机系统快速汽门非线性控制研究[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(12): 10-15.

[15] H. Borules, F. Colledani, M. P. Houry. Robust Continuous Speed Governor Control for Small-signal and Transient Stability [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 1994, 9(3): 1218-1225.

[16] 鲍文,于达仁,李松晶. 基于扭振分量极小化的 LQ/ $H_{\infty}$  最优汽门控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(4): 6-8.

[17] Subbarao G V, Iyer A. Nonlinear Excitation and Governor Control Using Variable Structures [J]. International Journal of Control, 1993, 57(6): 1325-1342.

[18] 刘瑞叶,于浩,陈学允. 带自调整因子的模糊变结构汽门控制[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(7): 27-29.

[19] LU Q, SUN Y Z, MEI S W. Nonlinear Control Systems and Power System Dynamics [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001.

[20] N. C. Pahalawatha, G. S. Hope, O. P. Malik. Multivariable Self-turning Power System Stabilizer Simulation and Implementation Studies [J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 1991, 6(2): 310-318.

[21] 刘伟,余贻鑫,田树苞. 变结构模型参考自适应励磁与调速综合控制器(上) [J]. 电力系统自动化, 1998, 22(4): 8-12.

[22] X. Y. Li, Y. H. Song, X. C. Liu, et al. Nonlinear Optimal-variable-aim Strategy for Improving Multimachine Power System Transient Stability [J]. IEEE Proc. Gener. Transm. Distrib, 1996, 143(3): 229-252.

[23] Youyi Wang, David J. Hill, Richard H. Middleton. Transient Stability Enhancement and Voltage Regulation of Power System [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(2): 620-627.

[24] 于占勋,陈学允. 用变结构控制理论设计的汽轮发电机组综合控制器[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(12): 27-29.

[25] 张腾,戴先中,陆翔. 基于逆系统方法的汽轮发电机组综合控制器[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(6): 27-30.

[26] Guo G X, Wang Y Y. Robust Nonlinear Controller for Power System Transient Stability Enhancement with Voltage Regulation [J]. IEE Proceeding of Generation Transmission Distribution, 1996, 143(5): 407-412.

[27] 王剑,毛宗源,许敬涛. 发电机励磁调速综合控制可行性分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 26(13): 74-78.

(收稿日期: 2015-01-14)