

非线性控制在电力系统中的应用*

吴捷 柳明

(华南理工大学电力学院·广州, 510640)

摘要: 对多种非线性控制技术的基本原理进行了简要的介绍,在此基础上结合电力系统的具体特性介绍了它们在电力系统的一些具体应用.最后,指出了电力系统非线性控制的发展趋势.

关键词: 电力系统;非线性控制;混杂控制;混沌;分叉;反馈线性化

文献标识码: A

Nonlinear Control and Its Applications in Power System

WU Jie and LIU Ming

(Electric Power College, South China University of Technology · Guangzhou, 510640, P.R. China)

Abstract: This paper gives a brief introduction of the basic elements of nonlinear technologies. Combining them with the characters of power systems, some detail applications of nonlinear control in power system are also presented. At last, the trends of nonlinear control in power system are pointed out.

Key words: power system; nonlinear control; hybrid control; chaos; bifurcation; feedback linearization

1 引言(Introduction)

电力系统是一个巨维数的强非线性系统,电力电子技术电力系统中的广泛应用进一步增加了系统的复杂程度.现代互连电网可以用重压、高度非线性、不连续来描述,因而难以在数学甚至概念上建模.这使得输配电网络的安全性、性能、传输控制的研究必须在非线性的基础上展开.

电力系统分析主要包括四个方面的问题^[1]:潮流平衡点的计算;功角稳定性;振荡;电压稳定性.为了分析的方便,早期多采用系统模型的线性化近似进行分析.常规的电力系统分析方法包括:静态的潮流方程求解,小扰动下基于线性化近似的稳定性分析,大扰动下的基于微分代数方程的数值仿真方法^[2].

近年来,现代控制理论已被引入到电力系统的控制中^[3,4],本文将对现有一些主要的非线性控制方法及其在电力系统控制中的应用进行介绍.首先介绍传统的李雅普诺夫方法,然后将介绍反馈线性化的三种方法.系统的精确线性化建立在完整的系统模型和精确的模型参数基础上,文章中介绍的自适应控制,滑模控制和非线性 H_∞ 控制能够有效地解决上述问题.结合电力系统的层次模型,我们将介绍近年来兴起的混杂控制.同时,还将对电力系统中的混沌与分叉现象,结构稳定问题进行简要的介绍.

2 电力系统模型(Models of power system)

电力系统模型大致可以分为五个部分:发电机,励磁控制系统,原动机调速系统,负荷和电网.其中前三个部分往往

在一起予以考虑.

同步发电机的模型从复杂到简单分为几类:六(五)阶模型同时考虑了定子,励磁和阻尼绕组的动态;三阶模型忽略了阻尼的动态;二阶模型忽略励磁和阻尼绕组的动态.

励磁的动态可以用一阶惯性环节描述.汽门控制的高压和中低压汽门调节均可以用二阶系统描述.由于汽轮机正常工作,中低压汽门不受控,故研究中只考虑高压汽门.为了研究的方便,还可以采用一阶环节来近似汽门控制.

电网一般采用导纳矩阵方程式 $I(E, U) = YU$ 来描述,其中 Y 为节点间的复导纳矩阵, I 表示节点注入电流,它是发电机内电势 E 和端电压 U 的函数.

电力系统模型中最为复杂的负荷的模型多采用等效负荷进行分析.等效负荷的特性包括静态特性和动态特性,其中静态特性多用二阶以下的多项式进行近似.而动态特性则呈现出明显的非线性特征,目前仍没有很好的描述方法,往往是根据研究的内容来假定.感应电动机在电力系统负荷中比重较大,作者对它的非线性控制进行了完整的评述^[5].文[6]中有专门的章节对负荷的动态特性进行介绍,文[7]则着重讨论了传输线路的非线性特性.

现代电力系统中的电力电子装置能够有效的控制潮流,动态调节传输线路的阻抗、阻尼有害的振荡,还可以完成无功补偿和移相等工作,它们的引入使得电力系统的动态更为丰富.其控制可参阅相关文章^[8-10].

电力系统网的经典模型假定负荷恒定,同时将发电机等

* 基金项目:国家重点基础研究专项经费(1998020308)资助项目.
收稿日期:2000-10-12; 收修改稿日期:2001-04-24.

效为暂态阻抗后恒定的电势.这在研究电力系统的非线性特性时显然是不够的,在考虑负荷和发电机动态特性的基础上,人们提出了三类结构保留模型,文[11]中给出了详细的介绍.

电力系统非线性控制的对象可以表达为仿射非线性模型,它具有以下形式:

$$\begin{aligned}\dot{X}(t) &= f(X(t)) + \sum_{i=1}^m g_i(X(t))u_i(t), \\ Y(t) &= h(X(t)).\end{aligned}\quad (2.1)$$

其中 $X, g_i \in \mathbb{R}^n$, $h(X) \in \mathbb{R}^m$ 分别为状态量,函数向量和输出向量, $u_i (i = 1, \dots, m)$ 为控制输入.

在电力系统的研究中,若综合考虑潮流、负荷和发电机动态的影响,则系统可采用微分代数方程进行描述,它具有如下形式:

$$\dot{x} = f(x, y, p), \quad (2.2)$$

$$0 = g(x, y, p). \quad (2.3)$$

上式中, x 表示发电机磁通、转子相位,控制状态和负荷动态等变量,它们满足方程(2.2), y 表示潮流约束,我们总是假定它的变化非常快,令方程(2.3)始终满足,从而认为方程(2.2)中的 y 是常数.上式中的 p 表示系统的结构参数,如系统的拓扑和设定点等,它一般是不变的.

电力系统的一个重要特征是它的层次结构,其底层为 SCADA 系统,上层是调度自动化系统. SCADA 系统完成对系统的实时监控;而电网调度自动化系统则用来确保电网安全、优质、经济地发供电,其主要功能包括实时网络状态分析、潮流调度、静态安全分析、负荷预测、发电计划和无功优化等,层次之间联系的纽带是远动系统,它完成调度范围内发电厂和变电站实时运行信息的采集、处理、传输和显示等功能.远动实时数据是电网调度和发、供、用电生产运行和管理的重要依据.上述系统的特征是连续控制与离散控制的混合,因而是一种典型的混杂系统.

3 李雅普诺夫方法(Lyapunov method)

对于一个非线性系统,若存在一个由其状态变量和控制量构成的正定函数(能量函数),通过判断其导数的负定性就可以判断整个系统的稳定性.利用这一原理,可以通过设计适当的反馈来满足上述要求,从而得到稳定的系统控制项.

电力系统是一个巨维数系统,单独采用李雅普诺夫方法设计全局控制是非常困难的,故往往将它与其它一些控制方法结合起来设计系统的控制.针对具有不确定参数的 SMIB 系统,在输入-输出线性化的基础上,文[12]用李雅普诺夫方法导出了全局稳定的自适应控制律.在反馈线性化的过程中,必需考虑零动态的稳定性,文[13]对零动态进行近似线性化,然后按照李雅普诺夫直接方法求出系统的非线性状态反馈来实现励磁控制.同样是在反馈线性化的基础上,由李雅普诺夫函数可以导出鲁棒的最优励磁控制^[14].对基于李雅普诺夫方法导出的鲁棒汽门控制和励磁控制的仿真表明^[15]:它在暂态稳定、临界清除时间和振荡衰减方面均比常规励磁控制和 PSS(power system stabilizer)控制拥有更好性能.

在整个电力系统稳定性的分析中,李雅普诺夫方法占据着重要的地位,目前采用的一些系统全局稳定性判定方法,多以它作为理论依据.

采用李雅普诺夫方法设计控制律的关键是选取合适的能量函数.由于结合李雅普诺夫方法进行控制设计的文献太多,李雅普诺夫函数的构造的技巧多种多样,本文未能一一列举.由于李雅普诺夫方法具有严格的理论证明和明确的物理意义,使它成为分析系统稳定性和综合系统控制律的有力工具.

4 微分几何方法(Differential method)

微分几何方法通过微分同胚映射实现坐标变换,根据变换后的系统设计非线性反馈,实现非线性系统的精确线性化.微分几何方法适合仿射非线性系统.对于仿射非线性 SISO 系统,若系统的关系度 r 等于系统的维数 n ,则一定可以构造出微分同胚映射,通过合理地构造非线性反馈,实现系统的精确线性化.对于关系度小于 r 和没有明确的输出的系统,通过构造一个虚拟的输出,同样有可能实现系统的线性化.具体的线性化设计方法可以参阅文[16].对于某些不能实现精确线性化,可采用零动态的设计方法,即通过反馈实现系统的外部响应线性化,对于内部响应,则只要系统稳定.

在采用微分几何方法实现系统精确线性的基础上,就可以根据对象控制的目标,采用相应的线性系统方法设计.如针对水平轴恒速风力发电机仿射非线性模型,文[17]按照 LQ 最优方法获得控制律;针对多机系统中存在的多模振荡,文[18]采用 ITAE 优化指标,有效地衰减了多模振荡,同时对系统结构参数变化具有很强的鲁棒性.文[8]对利用微分几何方法对电力系统主要组成部分进行变换、分析和控制进行了深入的分析.

微分几何方法具有坚实的理论基础,但是其控制律的推导对于数学基础的要求较高,同时非线性反馈的引入令到控制器的结构复杂,限制了它在工程中的广泛运用.不过,由于它具有完整的理论体系,因而易推广到更为复杂和抽象的模型上去,必将在更一般的非线性研究中成为有力的工具.

5 直接反馈线性化方法(Direct feedback linearization)

针对一个非线性系统,若能通过非线性反馈的引入,使得闭环系统成为具有线性表示形式的“伪”线性系统,则可以采用常规的线性系统控制方法设计系统控制.对于由微分方程描述的非线性系统:

$$y^{(n)} + a_{n-1}y^{(n-1)} + \dots + a_1y^{(1)} + a_0y = f(y^{(n-1)}, \dots, y^{(1)}, y, u^{(m)}, \dots, u^{(1)}, u, t). \quad (5.1)$$

其中 $n > m$, $r = n - m$ 称为系统的相对阶.令

$$v(t) = f(y^{(n-1)}, \dots, y^{(1)}, y, u^{(m)}, \dots, u^{(1)}, u, t), \quad (5.2)$$

则得到一个线性受控系统

$$y^{(n)} + a_{n-1}y^{(n-1)} + \dots + a_1y^{(1)} + a_0y = v(t). \quad (5.3)$$

这就是直接反馈线性化的一般思想.要将该思想应用到具体的控制工作中去,首先需要知道对于任意 $v(t)$, 符合条件(5.2)的控制 $u(t)$ 是否存在;其次,如果符合要求的控制

$u(t)$ 存在, 整个反馈系统是否稳定, 由隐函数定理可以知道, 若满足条件

$$\frac{\partial f}{\partial u^{(m)}} \bigg|_{(y_0, u_0)} \neq 0,$$

则在工作点 $[Y_0, U_0]$ 的一个邻域内, 方程(5.2)存在唯一解

$$u^{(m)} = g(y^{(n-1)}, \dots, y^{(1)}, y, u^{(m-1)}, \dots, u^{(1)}, u, t). \quad (5.4)$$

反馈(5.4)引入的隐动态与零动态有着同样的稳定条件. 对于 MIMO 系统, 也有类似的结论^[19].

利用 DFL 方法, 针对励磁控制律中的结构性参数, 采用输出量的微分结果来构造控制信号, 文[20]得到的结果与文[8]的结果一样, 但是推导的过程避免了复杂的数学推导.

常规的电力系统用 AVR (automatic voltage regulator) 来调节端电压, 用 PSS 来稳定系统. 若采用近似线性化的方法设计, 对工作点的鲁棒性较差. 为了实现端电压调节和系统镇定的一致, 需要采用端电压替代功角作为状态变量, 此时采用 DFL 方法不能实现系统的精确线性化. 但是系统的非线性部分是有界的, 将该部分作为系统的不确定项, 可采用非线性鲁棒最优控制方法实现系统的鲁棒控制^[21].

对于 SISO 系统, DFL 方法能得到与微分几何方法类似的效果, 而且推导过程简单. 对于 MIMO 系统则不具备上述优势, 而且相关结论的一般性不如微分几何方法.

6 逆系统方法 (Inverse system method)

对于一个可逆过程, 若输入信号先后经过逆过程和原过程, 则相当于进行了一次标准的单位映射. 逆系统方法就是利用这一思想, 通过求取被控过程的逆过程, 将之串联在被控过程的前面, 得到解耦的控制对象, 然后再对该对象采用传统的线性控制方法进行控制.

逆系统方法的使用需要解决两个问题: 一是系统是否可逆; 二是逆系统的求取方法. 文[22]对逆系统方法的原理和以往的一些主要结论进行了系统的论述.

针对 SMB 系统的励磁控制, 文[23]采用逆系统方法对系统进行解耦, 针对解耦后的系统, 采用 ITAE 的最优控制律, 获得了比 LOEC 更大的振荡阻尼和更高的响应速度, 避免了基于微分几何方法的复杂数学推导.

与 DFL 方法类似, 在一定的条件下, 逆系统方法和微分几何方法本质是等价的. 针对汽门非线性控制, 两种方法得到的控制律是一致的^[34].

7 变结构控制 (Variable structure control)

变结构控制一般定义如下, 考虑一非线性系统

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

确定一切换函数向量

$$s(x), \quad s \in \mathbb{R}^m,$$

同时寻求变结构控制

$$u_i(x) = \begin{cases} u_i^+(x), & s_i(x) > 0, \\ u_i^-(x), & s_i(x) < 0, \end{cases} \quad u_i^+(x) \neq u_i^-(x),$$

使得

1) 满足到达条件: 切换面 S 以外的相轨迹能在有限的

时间内到达切换面;

2) 切换面是滑动模态区, 且滑动运动渐近稳定, 动态品质良好.

有关变结构控制的系统论述参阅文[25].

在系统运行到滑动面上以后, 系统动态对模型参数和外部扰动具有很强的鲁棒性. 文[26]考虑了 SMB 系统的励磁控制, 首先利用微分几何方法实现系统的线性化, 然后利用输出误差和它们的导数构成了滑动面. 由于导数项的存在, 系统趋近的轨迹较为光滑. 考虑系统模型的不确定性, 若知道不确定性的上界, 则可以通过增大控制项的系数来予以补偿^[27]. 文[28]针对多机系统的经典模型, 结合反馈线性化方法, 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, 改善了系统的动态品质, 提高了稳定性. 由于用到了反馈线性化后的新状态变量, 其工程实现较文[27]复杂.

由于控制器的惯性等因素, 控制器不断的抖动切换带来变结构控制的抖振问题. 针对多机系统, 在微分几何变换的基础上, 以转子转速为跟踪目标设定滑动面, 可在滑动面附近设定切换邻域的方法来削弱抖振^[29].

8 非线性 H_∞ 控制 (Nonlinear H_∞ control)

非线性 H_∞ 设计目标是尽量减小输入信号的最大增益, 从而将不确定信号对系统输出的影响限制在需要的范围以内.

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, 估计出仍然存在的非线性项的上界. 将它们作为不确定项处理, 采用线性 H_∞ 方法进行设计, 另外一种思路以减小闭环系统的 L_2 增益作为设计目标, 针对非线性系统, 该方面的结论集中在仿射非线性系统方面, 其设计可以归结为 HJI (Hamilton Jacobi Inequalities) 方程的求解问题.

对于分布式系统负荷频率控制 (LFC) 问题, 若系统的状态结构扰动符合 "RANK-ONE" 条件, 输出结构表达为乘性不确定; 或者两种不确定性均可表示为状态矩阵的乘性匹配条件, 均可以通过求解扩展的黎卡迪方程获得系统的分布式鲁棒控制律^[30,31].

针对多机系统的励磁控制, 文[32]采用 DFL 方法对系统进行线性化, 然后将系统存在的非线性项表示为线性有界的不确定函数; 文[33]针对 SMB 系统采用 DFL 方法线性化后, 将控制律中的传输线阻抗和母线电压作为系统的结构不确定性处理, 同时假定不确定性满足模有界条件; 在文[34]中, 该方法被推广至多机系统, 通过求解一组黎卡迪方程来获得控制律; 若考虑引入静止无功补偿 SVC 控制, 可以采用同样的方法, 对励磁控制和 SVC 控制分别进行设计^[35].

仿射系统 H_∞ 控制可以归结为 HJI 不等式的求解. 采用该方法, 文[36]给出了 SMB 系统励磁控制的线性反馈和非线性反馈的解决方案. 存在弱耦合的传输线工作在重负荷的情况下, 大扰动将引起 0.1 ~ 0.8 Hz 系统振荡, 严重时甚至有可能导致系统崩溃, 文[37]通过 HJQ 不等式的求解获得了对扰动鲁棒的 H_∞ 励磁控制器.

9 自适应控制 (Adaptive control)

自适应控制的研究对象是具有一定程度不确定性的系

统,自适应控制器能够修正自己的特性以适应对象和扰动的动态变化,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;自校正调节器则根据对象的输入/输出特性在线的对对象参数进行递推估计,然后根据递推得到的模型实时调整控制律。

反馈线性化方法依赖于非线性的精确抵消,当系统参数变化时,可以采用参数自适应调整来保证非线性项的渐近抵消。若向量场的不确定项是线性的,则可以采用它的自适应估计来代替,采用该方法,文[38]设计了自适应励磁控制器。采用自校正技术,文[39]在直接反馈线性化的基础上给出了移相控制器的设计。

TCSC 可以直接对传输线路上的潮流进行调度,从而有效地改进电力系统的性能。文[40]提出的非线性控制器采用微分几何方法实现了系统的精确线性化,针对线性模型设计 LQR 控制律。对于系统的不同传输状态,采用自适应方法调整控制参数,使得系统始终工作在稳定区域。

系统输电线路发生故障时,其有效阻抗将发生变化,将它作为系统结构参数的变化,利用自适应方法对该变化进行估计。同时计及系统的非线性特性,对系统反馈线性化,可以实现功角稳定和电压调节^[41]。

采用 TCSC 控制,当扰动大时,可以采用非线性预测控制器使得状态回到平衡点附近,此时改用线性控制器实现局部的渐近稳定^[42]。针对同步发电机的离散时间模型,采用广义预测控制技术,文[43]用含有非线性项的控制实现了对功角的控制。针对 SMIB 系统的双线性模型,以输出误差和控制幅度为控制指标,文[44]给出的 TCSC 广义预测控制能够有效地估计出系统动态,从而快速地衰减故障所引起的振荡。

电力系统中潮流的谐波分量会造成电能质量的污染,因此有必要对其谐波分量进行谐波补偿,此时可以对谐波进行自适应预测,然后根据预测来设计补偿律^[45]。

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,只是适合于一些渐变和实时性不高的过程;同时,由于跟踪误差的解耦问题,其在多输出系统中的应用并没有一般性结论,这些都限制了它在电力系统中的广泛应用。

10 分叉理论与结构稳定性(Bifurcation and structure stability)

通俗地说,当系统模型的微小变动下影响系统状态空间中任意起点的运动轨迹的定性特征时,我们称系统是结构稳定的。当系统在某个模型参数值变化到一个特定数值时,系统的定性特征随该参数的微小变化而发生变化,则该点称为分叉点。

分叉的研究首先要知道什么时候存在分叉现象;然后才考虑分叉的控制。分叉的控制是指通过控制手段去改变动力系统分叉现象的各种特征,主要的控制手段则是线性和非线性反馈。

分叉现象在电力系统中是普遍存在的,随着近年来电网大停电事故的屡屡发生,采用分叉理论来描述和解释事故机理成为了一个研究热点。文[46]通过仿真研究了一个由带 AVR 的单机,带补偿的感应电机负荷和无穷大母线构成的系统中存在的非线性现象。揭示了由分叉和混沌所导致的电压崩溃的机理。

采用详细发电机模型,文[47]研究了各种负荷模型所引起的分叉情况,文[48]则着重研究了动态负荷模型中无功变化所引起的分叉情况。文[49]研究了计及发电机暂态电势及励磁系统动态特性的复杂模型的分叉情况,结果表明在轻载情况下,系统发生 HOPF 分叉,产生振荡,而重载情况下,则与结构保留模型类似,励磁系统的放大倍数可以影响分叉的形式。

对于多机模型,由于其非线性程度更复杂,故分叉的现象更为丰富,以三节点模型为基础,分别以机械功率、负荷母线有功和无功,以及 AVR 控制的参考电压作为分叉参数,可以在系统中发现鞍结、Hopf、倍周期、环、音叉等多种分叉现象的存在^[50]。

根据分叉理论,静分叉是从稳定走向失稳的临界点。因此,分叉点的位置和类型对于了解系统的稳定性及其变化规律有着重要的意义。针对以微分代数方程描述的电力系统模型,文[51]给出了恒功率负荷模型和恒电流负荷模型出现分叉的充要条件。

文[52]针对动态负荷对电压稳定性的影响,给出了电压稳定性的定义,得到了电力系统非线性电路发生转折分叉与负荷动态非周期失稳一致的结论。

目前的分叉研究主要在于揭示系统中存在的分叉现象,分叉的控制则集中于不稳定分叉的消除,对于引起系统崩溃亚临界 Hopf 分叉,通过励磁控制器增益的调整^[53]和非线性反馈的引入^[54],可以将亚临界分叉转变为超临界分叉。事实上,各种柔性交流输电变流器(FACTS)装置的合理使用可以有效地控制混沌和分叉的产生,更深层次的分叉控制问题还有待进一步的研究。

11 混沌及其控制(Chaos and its control)

混沌指一种貌似无规的运动,一种对初值特别敏感的内在随机运动,在较长一段时间内是不可预测的,但支配它这种运动的规律却可用确定性的方程来描述,从更深的层次来看,混沌运动的本质特征是系统长期行为对初值的敏感依赖性,混沌运动的另一个特征是具有奇异吸引子,即相空间中的一个低维集合,一方面它是稳定的,因为运动限定在该集合(吸引子)中,另一方面,在该集合中的运动则极不稳定,含有反馈的系统都有可能产生混沌,因而混沌是一种普遍的现象。

一般而言,混沌控制指改变系统的混沌形态,使之呈现出周期性动力行为,它包括抑制、引导和跟踪问题。跟踪问题目前研究得较多,尤其是其中的镇定问题。最早提出的 OGY 方法就是通过一系列的参数扰动来改变运动轨迹,使之达到预定的稳定区域。对于混沌系统,可以对系统线性化,然后引

入反馈消除原有的混沌性质,自适应方法和逆系统方法也可以达到同样的效果.更多的混沌控制方法可以参阅文[55].

在电力系统中,即使是简单的 SMIB 模型,也存在着混沌现象^[56].进一步的研究更表明,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^[57].通过计算李雅普诺夫指数,证实了三机系统中存在 Arnold 色散现象^[58].

由于混沌运动的复杂性,对于混沌现象本身的研究还不是很透彻,目前的研究主要在于揭示其奇异特性,关于混沌控制的问题只是近年来才刚刚展开,对于电力系统中混沌现象的研究,也仅限于寻找一些混沌现象,目前还谈不上混沌控制的研究,但是还是有研究利用了混沌的某些特性,由于混沌运动具有与随机运动类似的行为,故可以采用混沌运动来对快速变化的非线性负荷建模^[59].文[60]从混沌时间序列法入手,得到了一种利用确定性混沌实现短期负荷预测的方法.

12 混杂控制(Hybrid control)

混杂系统由互相影响的离散动态和连续动态系统构成^[61].下层控制系统是上层的执行机构,而上层控制系统的对象是下级系统的监控器.它通常由 DES(discrete event system)监控器,接口和过程控制系统构成,DES 按照人为规律控制和协调被控过程的宏观行为,控制开关是 DES 监控器的执行机构.

混杂系统的设计分为三部分^[62],首先设计实时控制环,然后综合离散控制逻辑,在此基础上,设计两个系统之间的翻译系统.混杂系统的底层是连续动态系统,其控制也可以采用常规的控制策略;混杂系统的顶层实质上是一个离散动态系统,故可采用一些传统的方法进行控制,如 Petri net(PN),对于那些所需信息和可行对策均为语言表达形式,而非数值形式的系统,语意动态系统非常适合于用来建模和评估高层决策系统.

近年来,混杂控制已经引入到了电力系统的研究中,针对以微分代数形式表达的电力系统,文[63]从轨迹灵敏度分析的角度考虑了参数以及事件触发对系统轨迹的影响.考虑到混杂系统的控制策略切换引起的参数变化情况更加频繁,文[64]研究了系统的平衡点类型和分叉情况,由于事件需要持续一段时间,文[65]引入局部定时器来作为事件触发的条件,提出了可编程带时标 PN 的概念,使用该方法考察了四机系统中利用发电机绕组切换以确保零频率误差的控制策略.

混杂控制的一个重要应用是紧急事件处理.虽然继电保护装置可以将故障切除,但是却不能保证切除故障后的系统稳定,故需要对故障后状态进行分析,由于实时性的要求,多采用策略表的方式进行处理.这种方法没有自适应能力,当网络结构变化时,还需要离线生成新的策略表,集中分层式方法可以部分解决这一问题^[66],进一步的解决方案则取决于混杂系统与传统的优化设计方法的结合^[67].

混杂控制在电力系统更多的应用是在高层调度和潮流优化等方面.一个例子是抽水蓄能电站的多种工况的调度控

制^[68].事故恢复系统也是一个很好的实例^[69],系统在正常运行时避免临界状态的出现,而在故障发生后则通过故障隔离,形势评估,局部供电恢复尝试,局部电网连接等一系列的策略以尽快地恢复系统的供电.

13 结论与展望(Conclusions and vista)

非线性控制已经具备了较为完整的理论体系,可以说,由于反馈线性化方法的引入,单机控制的研究已经得到了较理想的解决,目前主要存在的问题在于对于多机系统的稳定性分析和控制策略方面,目前的一些结论都是在充分简化的基础上得到的.由于理论上尚未得到严格的证明,故投入实际应用的很少,随着电力系统的发展,新的技术下不可避免的要引入至电力系统的研究中去,笔者认为,以下几个方面是将来研究的重点.

将非线性几何控制理论与电力系统的特性相结合,应该成为我们分析和综合电力系统的重要方法.目前反馈线性化方面的结果多属单输入单输出的控制,且集中在仿射非线性系统方面.从电力系统的发展来看,多变量协调控制研究是非常必要的.

在非线性能量控制方面,目前的结论多建立在一些较强的假设下面,这主要是因为目前的研究没有针对性,往往是让电力系统去适应一些普遍的结论.结果显得比较保守,若针对电力系统的特点,应该能够放宽限制条件,得到一些应用性更强的结论.

目前电力系统的分叉研究还集中在揭示分叉现象的存在方面,而更重要的分叉控制则缺乏一般性的结论,充分地研究电力系统中分叉的控制,对于稳定域的确定和扩展将会带来一些新的思路.

混杂系统的研究对于电力系统最优运行,潮流的最优调度和高层决策系统都可以起到改善作用,将它与智能控制方法结合,并集成至现有的 EMS/DMS 系统中,是电力系统调度自动化发展的趋势^[70].但是关于混杂系统的一些理论,如能控性、稳定性,仍需得到普遍意义下的定义,关于混杂系统的控制也必须考虑时延等特点.

电力系统是一个耗散的受迫哈密顿系统,广义哈密顿系统理论在电力系统的稳定和优化控制中有着广泛的应用前景,文[71]已经在这方面进行了有益的尝试,给出了励磁系统的基于能量的李雅普诺夫函数,并考察了该受迫系统的稳定性;同时以简化的电网模型为研究对象,得到了广义哈密顿系统与坐标无关的全局模型.

参考文献(References)

- [1] Hill J. Special issue on nonlinear phenomena in power systems: Theory and practical implications [J]. Proceedings of the IEEE, 1995, 83(11): 1439 ~ 1441.
- [2] Hiskens I A. Analysis tools for power systems - contending with nonlinearities [J]. Proceedings of the IEEE, 1995, 83(11): 1573 ~ 1587.
- [3] Wu Jie, Liu Yongqiang and Chen Wei. The application of modern control techniques in power system control (I) [J]. Proceedings of

- Chinese Society for Electrical Engineering, 1998, 18(6):377 - 382 (in Chinese)
- [4] Wu Jie, Chen Wei and Liu Yongqiang. The application of modern control techniques in power system control (II) [J]. Proceedings of Chinese Society for Electrical Engineering, 1998, 18(6):383 - 387 (in Chinese)
 - [5] Wu Jie, Yang Jinming and Xue Feng. The applications of modern control techniques in AC drives [J]. Control Theory and Applications, 1999, 16(Suppl.):73 - 81
 - [6] Cutsem T V and Vournas C. Voltage Stability of Electric Power Systems [M]. London: Kluwer Academic Publishers, 1998
 - [7] Oprea L and Velicescu C. Modeling nonlinear frequency dependent transmission line for electromagnetic studies in power systems [A]. Proceedings of the Mediterranean Electro-technical Conference [C], Bari, Italy, 1996, 798 - 801
 - [8] Lu Qiang and Sun Yuanshang. Nonlinear Control of Power System [M]. Beijing: Science Press, 1993 (in Chinese)
 - [9] Liu Mingjian, Wu Jie and Xue Feng. An overview of control theories in power electronics [J]. Control Theory and Applications, 1999, 16(4):470 - 473 (in Chinese)
 - [10] Liu Mingjian, Wu Jie and Xue Feng. An overview of control theories in power electronics [J]. Control Theory and Applications, 1999, 16(5):630 - 633 (in Chinese)
 - [11] Yu Yuxin and Wang Chengshan. Theory and Method of Power System Stability [M]. Beijing: Science Press, 1999 (in Chinese)
 - [12] Liao Teh-Lu. Design of an adaptive nonlinear controller to improve stabilization of a power system [J]. Electrical Power and Energy System, 1992, 21(6):433 - 441
 - [13] Aumé Francis OKOU, Ouassima AKHRIF and Louis-A DESSAINT, et al. Nonlinear control of non-minimum phase systems: Application to the voltage and speed regulation of power system [A]. Proceedings of IEEE 1999 Int. Conference on Control Application [C], Hawaii, USA, 1999, 609 - 615
 - [14] Liu Guoxian, Lin Xiaoshu and Yang Qixun. Study of excitation control under transient conditions for multimachine power systems based on energy function [J]. Proceedings of Chinese Society for Electrical Engineering, 1997, 17(4):264 - 268 (in Chinese)
 - [15] Cai H, Qu A and Dorsey J F. A comparison and simulation study of nonlinearly designed robust controllers for power system transient stability [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2000, 22(1):15 - 28
 - [16] Cheng Daizhan. Geometry Theory for Nonlinear System [M]. Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese)
 - [17] Bao Nengsheng and Jiang Tong. Application of differential Geometry in horizontal axis fixed speed wind turbine system [J]. Acta Energeticae Solaria Sinica, 1999, 20(2):130 - 134 (in Chinese)
 - [18] Cao Y J, Wu Q H and Jiang L, et al. Nonlinear control of power system multi-mode oscillations [J]. Electrical Power & Energy System, 1998, 20(1):61 - 68
 - [19] Gao Long, Hill D J and Wang Youyi, et al. Direct feedback of nonlinear control system and the hidden dynamics [J]. Journal of Tsinghua University (Sci. & Tech.), 1996, 36(9):1 - 8 (in Chinese)
 - [20] Yu Daren and Mao Zhiwei. A study of fault-tolerance of nonlinear excitation control based on the direct feedback linearization [J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(12):1 - 5
 - [21] Zhu C, Zhou R and Wang Y. A new nonlinear controller voltage controller [J]. Electrical Power & Energy System, 1997, 19(1):19 - 27
 - [22] Li Chunwen and Feng Yuankun. Inverse Method for Multi-value Nonlinear Control [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1991 (in Chinese)
 - [23] Tang Taonan, Wei Shoupin and Chen Shijie, et al. Nonlinear excitation based on inverse method [J]. J. of Huazhong University of Science & Technology, 1998, 26 (Suppl.):47 - 49
 - [24] Li Donghai, Jiang Xuezhi and Li Liqing, et al. The inverse system method applied to derivation of power system nonlinear control laws [J]. Journal of North China Power System University, 1997, 24(4):65 - 70 (in Chinese)
 - [25] Gao Weibing. Theory and Design Method of Variable Structure Control [M]. Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese)
 - [26] Sharif S S. Nonlinear power system stabilizer design technique [A]. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering [C], Montreal, Canada, 1995, 44 - 47
 - [27] Cela A, Hamam Y and Nielsen J R, et al. Nonlinear approach to the control of multimachine power systems [J]. Nonlinear Analysis, Theory, Methods & Applications, 1997, 30(7):4301 - 4308
 - [28] Liu Wei, Tian Shubao and Yu Yixin, et al. A generator excitation controller based on the hybrid control scheme with feedback linearization and variable structure [J]. Journal of Tianjin University, 1998, 31(5):611 - 615 (in Chinese)
 - [29] Samarasinghe V G C C, Pahalawaththa N C. Stabilization of a multi-machine power system using nonlinear robust variable structure control [J]. Electric Power System Research, 1997, 43(1):11 - 17
 - [30] Ray G, Prasad A N and Bhattacharyya T K. Design of decentralized robust load-frequency controller based on SVD method [J]. Computers and Electrical Engineering, 1999, 25(6):477 - 492
 - [31] Ray G, Prasad A N and Prasad G D. A new approach to the design of a robust load-frequency controller for large scale power system [J]. Electric Power Systems Research, 1999, 51(1):13 - 22
 - [32] Zhu Chunlei, Zhu Rujing and Wang Youyi. A new decentralized nonlinear voltage controller for multimachine power systems [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1998, 13(1):211 - 216
 - [33] Wang Youyi and Hill D J. Robust nonlinear coordinated control of power systems [J]. Automatica, 1996, 32(4):611 - 618
 - [34] Wang Youyi, Tan Y L and Guo Guoxiao. Robust nonlinear coordinated generator excitation and SVC control for power systems [J]. Electrical Power and Energy System, 2000, 22(3):187 - 195
 - [35] Guo Yi, Hill D J and Wang Youyi. Nonlinear decentralized control of large-scale power systems [J]. Automatica, 2000, 36(9):1275 - 1289
 - [36] Li Shurong, Lu Qiang and Sun Yuanshang. Nonlinear H_∞ stabilizers design for power systems [A]. Proceeding of the IEEE Int. Conference on Industrial Technology [C], Shanghai, China, 1996, 748 - 752

- [37] Li G J, Lie T T and Soh C B. Decentralized nonlinear H_∞ control for stability enhancement in power systems [J]. IEE Proceeding: Generation, Transmission, Distribution, 1999, 146(1): 19-24
- [38] Jain S, Khocrami F and Fardaneh B. Adaptive nonlinear excitation control of power systems with unknown interconnections [J]. IEEE Trans. on Control Systems Technology, 1994, 2(4): 436-446
- [39] Tan Y L and Wang Y. Nonlinear excitation and phase shifter controller for transient stability enhancement of power systems using adaptive control law [J]. Electrical Power & Energy Systems, 1996, 18(6): 397-403
- [40] Zhon X X and Liang J. Nonlinear adaptive control of TCSC to improve the performance of power systems [J]. IEE Proceeding: Generation, Transmission, Distribution, 1999, 146(3): 310-305
- [41] Lee D K, Yoon T Y and Lee B, et al. Adaptive nonlinear control of a power system [A]. Proceeding of the 1998 IEEE Int. Conference on Control Application [C], Trieste, Italy, 1998, 1240-1244
- [42] Rajkumar V and Rohler R R. Nonlinear predictive control for the damping of multimachine power system transients using FACTS devices [A]. Proceeding of the 33rd Conference on Decision & Control [C], Lake Buena Vista, Florida, USA, 1994, 4074-4079
- [43] Rajkumar V and Mothler R R. Nonlinear control methods for power systems: A comparison [J]. IEEE Trans. on Control Systems Technology, 1995, 3(2): 231-237
- [44] Mohler R R, Zakrzewski R R and Vedam R. Nonlinear control algorithms and power system application [J]. Applied Mathematics and Computation, 1996, 78(2): 197-207
- [45] Amirazodi J, Yaz E E and Olejczak K J. Adaptive compensation of nonlinear loads in power systems [A]. Proceedings of the Annual Southeastern Symposium on Systems Theory [C], Baton Rouge, LA, USA, 1996, 379-383
- [46] Ohia h and Ueda Y. Global bifurcation caused by unstable cycle leading to voltage collapse in an electric power system [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 1998, 9(6): 825-843
- [47] PAI M A, Sauer W and Lesneure Z C. Static and dynamic nonlinear loads and structural stability in power systems [J]. Proceeding of the IEEE, 1995, 83(11): 1562-1572
- [48] Wang Hongzhe and Deng Jixiang. Analysis voltage stability using Hopf bifurcation theory [J]. Proceedings of the Electrical Power System Automatic, 2000, 12(1): 5-10 (in Chinese)
- [49] Han Wen and Han Zhenxiang. Bifurcation and stability of complicated model of power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(5): 46-52 (in Chinese)
- [50] Rajesh K G and Padiyar K R. Bifurcation of a three node power system with detailed models [J]. Electrical Power and Energy Systems, 1999, 21(5): 375-393
- [51] Peng Zhiwei, Hu Guogeng and Han Zhenxiang. Analysis for effects of the load characteristic on power system voltage based on bifurcation theory [J]. Proceedings of Chinese Society for Electrical Engineering, 1997, 17(6): 173-177 (in Chinese)
- [52] Liu Yongqiang. Study of bifurcation, structural stability and voltage stability in power systems [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 1999 (in Chinese)
- [53] Srivastava K N and Srivastava S C. Elimination of dynamic bifurcation and chaos in power systems using facts devices [J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems - I: Fundamental Theory and Applications, 1998, 45(1): 70-78
- [54] Nayfeh A I, Harb A M and Chin C M. Bifurcations in a power systems model [A]. Proceedings of IEEE Int. Symposium on Circuits and Systems [C], Seattle, WA, USA, 1995, 283-286
- [55] Chen Guanrong. Control chaos in nonlinear dynamical systems [J]. Control Theory and Applications, 1997, 14(1): 1-6 (in Chinese)
- [56] Ji Weijun and Venkatasubramanian V. Hard-limit induced chaos in a single-machine-infinite-bus power system [A]. Proceeding of the 34th Conference on Decision & Control [C], New Orleans, LA, USA, 1995, 3465-3470
- [57] Wildberger M. Stability and nonlinear dynamics in power systems [J]. IEEE Power Engineer Review, 1994, 14(10): 16-18
- [58] Lo K L and Zhu T X. Arnold diffusion in a particular multi-machine power system [J]. IEE Proceeding: Generation, Transmission, Distribution, 1998, 145(3): 254-267
- [59] Carrillo E O, Heydt G T and Kostelich E J, et al. Nonlinear deterministic modeling of highly varying loads [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1999, 14(2): 537-542
- [60] Mori H and Urano S. Short-term load forecasting with chaos time series analysis [A]. Proceedings of the Int. Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems [C], Orlando, FL, USA, 1996, 133-137
- [61] Antsaklis P J and Nerode A. Hybrid control systems: An introductory discussion to the special issue [J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 1998, 43(4): 457-460
- [62] Bencze W J and Franklin G F. A separation principle for hybrid control system design [J]. IEEE Control Systems Magazine, 1995, 15(2): 80-85
- [63] Hiskens I A and Pai M A. Trajectory sensitivity analysis of hybrid systems [J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems, 2000, 47(2): 204-220
- [64] Chen Luonan and Aihara K. Bifurcation analysis of hybrid dynamical systems [A]. Proceedings of the IEEE Int. Conference on Systems, Man, and Cybernetics [C], San Diego, CA, USA, 1998, 857-862
- [65] Koutsoukos X D, Antsaklis P J and He K H, et al. Programmable timed Petri nets in the analysis and design of hybrid control systems [A]. Proceeding of the 37th Conference on Decision & Control [C], Tampa, USA, 1998, 1617-1622
- [66] Li Han, Ming Yong and Hang Yingduo. Design on Centralized-hierarchical stability control system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(13): 37-40 (in Chinese)
- [67] Qin Shuyin and Song Yonghua. The analysis of architecture of hybrid control system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(11): 5-9 (in Chinese)
- [68] Zhang Yonggang and Ye Luqing. CPN-based control of operating mode transition for pumped-storage set: modelling and implementation [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(3): 35-39 (in Chinese)

- [69] Ebert A, Eppel M and Genthe S, et al. System restoration of a transmission network [A]. Proceedings of the Int Conference on Energy Management and Power Delivery, Part 1 [C], Singapore, Singapore, 1995, 91 - 95
- [70] Lu Qiang and Mei Shengwei. Visual research on collapse prevention and optimal operation of modern power systems [J]. Electric Power, 1999, 32(10): 25 - 28 (in Chinese)
- [71] Cheng Dazhan, Xi Zaurong and Hong Yiguang, et al. Energy-Based

stabilization of forced Hamiltonian systems with its application to power systems [J]. Control Theory and Applications, 2000, 17(6): 798 - 802

本文作者简介

吴捷 1937 年生,教授,博士生导师,1961 年毕业于哈尔滨工业大学,主要研究方向为电力系统自动化,非线性控制,自适应控制等。

柳明 1970 年生,博士研究生,研究方向为电力系统非线性控制。

(上接第 14 页)

- [43] Xu Feng and Sun Youxian. Robust identification theory and application [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1994
- [44] Wu Xuguang. Robust identification on undeterministic system and development [J]. Control and Decision, 1996, 11(Suppl.1): 56 - 60
- [45] Schrama R J P and Bosgra O H. Adaptive performance enhancement by iterative identification and control design [J]. Int. J. Adaptive Control and Signal Processing, 1993, 7(7): 475 - 487
- [46] Bayard D S, Hadaegh F Y and Yam Y, et al. Automated on-orbit frequency domain identification for large structures [J]. Automatica, 1991, 27(8): 931 - 946

本文作者简介

莫建林 1973 年生,1996 年毕业于上海交通大学能源工程系,1998 年获该校电气传动自动化专业硕士学位,现为该校自动化系博士研究生,研究兴趣为系统辨识与信号处理 Email: jlmiao@263.net

王伟 1962 年生,上海交通大学自动化系副教授,在德国多特蒙德大学获博士学位,研究方向为鲁棒控制, Email: sjtuata@online.sh.cn

许晓鸣 1957 年生,上海交通大学副校长,自动化系博士生导师,研究方向为复杂工业对象的智能控制。

张卫东 1967 年生,上海交通大学自动化系副教授,研究方向为系统辨识与鲁棒控制。