

控制理论在电力电子学中的应用(下)

——非线性与智能化方法

刘明建 吴捷 薛峰

(华南理工大学电力学院·广州, 510640)

摘要: 综述了电力电子学中的自适应控制、滑模变结构控制、神经网络控制及模糊控制, 并对非线性控制及智能控制在电力电子学中的应用前景作出了展望。

关键词: 电力电子; 自适应控制; 滑模变结构控制; 神经网络控制; 规模控制

An Overview of Control Theories in Power Electronics

——Nonlinear and Intelligent Method

Liu Mingjian, Wu Jie and Xue Feng

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

Abstract: This paper provides an overview of the control methods in power electronics, with an emphasis on the potential application of control theories in this field.

Key words: power electronics; adaptive control; variable structure control with sliding mode; neural network control; fuzzy control

1 自适应控制在电力电子学中的应用(The application of adaptive control in power electronics)

自适应控制在 50 年代初, 人们设计高性能飞机的自动驾驶仪时, 就对它进行了广泛的研究。自适应控制的目标是使控制系统对过程参数的变化, 以及对未建模部分的动态过程不敏感。当过程动态变化时, 自适应控制系统试图感受这一变化并实时地调节控制器参数或控制策略。自适应控制系统主要有两大类, 即: 模型参考自适应系统和自校正控制系统。

模型参考自适应系统是利用一个生成所期待响应的模型作为参考模型并将其包括在控制策略中。利用实际系统与参考模型响应间的误差来修正控制器参数以便使实际系统的响应收敛于所期待的响应。其核心问题是如何综合自适应律, 即自适应机构所遵循的算法。常用的自适应律的设计方法主要有两种, 其中一种是局部参数最优化法, 即利用梯度或其它参数优化的递推算法, 求得一组控制器的参数, 使得某个预定的性能指标, 如 $J = \int e^2(t) dt$, 达到最小。该方法的缺点是不能保证在参数调整的过程中, 系统总是稳定的。自适应律的另一种设计方法是基于稳定性理论的方法, 其基本思想是保证控制器参数自适应过程是稳定的, 然后再尽量使该过程收敛快一些。Lyapunov 稳定性理论和 Popov 的超稳定性理论都是设计自适应律的有效工具。由于保证系统稳定是任何闭环系统的基本要求, 所以基于稳定性理论的设计方法

引起了更广泛的关注。

自校正控制的主要特点是具有一个被控对象数学模型的在线辨识环节, 即对象参数的递推估计器, 它的基本思想是将参数估计递推算法与各种不同类型的控制算法结合起来, 形成一个能自动校正控制器参数的实时的计算机控制系统。如果估计出的全部参数或部分参数用于构造控制器而无需进行控制器的计算, 这种控制器被称为隐式自校正控制器。而那种需利用辨识出的参数来对控制器进行设计计算的控制器则被称为显式自校正控制器。K. J. Astrom 和 B. Wittenmark 用最小方差原理提出了一种隐式自校正控制器 (1973), 随后他们又提出了极点配置的显式自校正控制器 (1980), 这种自校正控制器具有很广泛的适用范围, 对不稳定系统、非最小相位系统也能适用。它的缺点是计算量过大, 从而限制了它的实际使用。

自适应控制在电力电子系统中的应用已有文献报导。文 [2] 针对超声换能器性能一致性差、焊接对象多变、焊接过程参数变化明显等特点, 用稳定性理论设计了具有可调增益的模型参考自适应控制系统。实验结果证明: 采用自适应控制后, 超声塑焊机开关电源性能及可靠性都有较大的提高, 在同等的负载和输入电压的条件下, 其效率比原来的提高 3% ~ 5%, 而且频率自动跟踪。

近年来, 随着电力电子装备的日益广泛应用, 电网中的谐波污染也日益严重, 造成了电网电压及电网电流波形严重畸变, 导致供电质量下降。如何消除电网中的高次谐波和无

功电流使之成为洁净电源,已成为电力电子学、电力系统中的一个重要问题,因此有源滤波器成为电力电子学中的一个热点.在有源电力滤波器中有两个关键的问题,其中一个是如何实时、精确地检测出负荷电流中的畸变成分.文[3]提出了基于自适应干扰抵消原理的自适应闭环检测法.该方法属于自适应滤波,它是根据自适应干扰抵消原理,把电压作为参考输入,负载电流作为原始输入,即基波电流作为噪声源,谐波电流作为信号源,构成一个闭环连续调整的谐波及无功电流自适应检测系统.该系统全部采用模拟电路实现.实验结果表明:该检测系统的运行特性与元件参数几乎无关,对器件特性的依赖性也不大;当电源电压产生波形畸变和基频偏移时,检测系统仍能够正常运行,并具有良好的自适应能力.因此可以认为,该检测方法是一种具有较好发展前途的新方法.

笔者认为,在诸如对给定精确信号进行重复跟踪并消除开关器件产生的谐波等有源滤波以及 SPWM 发生器的控制方面,以内模原理及极点配置为主要特点的自校正控制器将具有潜在的应用前景^[4].

目前,自适应控制在电力电子系统中的应用还十分初步.由于它对过程参数的变化以及对未建模部分的动态过程不敏感、对动态过程变化的自适应性等特点,必将使人们越来越多地将它应用于电力电子系统的控制中去.

2 滑模变结构控制在电力电子学中的应用(The application of sliding mode control in power electronics)

滑模变结构控制^[5,6]出现于 50 年代,是由苏联学者埃米李亚诺夫、乌托金等人提出并首先研究的,近年来在控制领域越来越引起人们的注意.这种控制方案在本质上是一种开关型控制,它要求频繁、快速地切换系统的控制状态.近年来由于数字计算机技术的发展和微机的出现,使它的实现成为可能.滑模变结构控制已成功地应用于许多领域,如机器人手臂、水下推动器、汽车变速器和发电机、高性能电机及其电力系统,而应用于电力电子系统则刚刚开始.

滑模变结构控制与常规控制的根本区别在于控制的不连续性,即一种使系统“结构”随时间变化的开关特性.其基本思想是:利用高速开关将系统的相轨迹引导到一个由设计者所选择的可达到的曲面 $S(x) = 0$ 上,这一曲面位于状态空间之中被称为切换面或滑动面,只要满足 $\dot{S}S < 0$ 这一条件,便称超曲面 $S(x) = 0$ 是可达到的.系统的状态向量进入切换面后,就被约束在 $S(x) = 0$ 的子空间中作小幅度、高频率的上下运动,即“滑模”运动.此时,系统的动态品质由切换面的参数决定,而与系统参数的摄动、扰动的影响无关,即:变结构控制具有对滑模摄动的不变性.这种不变性显然比鲁棒性更进了一步,称之为完全鲁棒性或理想鲁棒性.特别要注意:在变结构控制设计中合理地选择切换面 $S(x)$ 是极为重要的,这直接影响到滑模运动的动态性能.

由于变结构控制的设计思想是利用“开关”变更控制律,因而具有不断改变系统结构的特征,其出发点不是基于线性

系统,而是针对含有非线性系统在内的一般系统.故此它可被用来处理非线性问题,很适用于电力电子这个非线性系统,使它具有强鲁棒性.

滑模变结构控制在电力电子系统中改善鲁棒性、动态品质方面取得了一些成果^[7~14].文[7]详细介绍了 DC-DC 变换器的滑模变结构控制,论述了如何以等效控制作为分析手段来分析 Buck, Boost, Buck-Boost 变换器,该方法保证了系统在大信号和小信号情况下的稳定性.在应用滑模变结构理论控制 DC-DC 变换器方面,该文具有较大的指导意义.文[8]采用滑模变结构理论控制 Cuk 变换器,使得系统控制电路的实现比较简单,克服了其它方法中在大信号情况下不稳定的缺点;在整个运行条件下,所有的状态变量的超调量小、调整时间短,具有很好的静态特性和动态特性;此外,还大大减小了能量传输电容的大小.实验结果表明:采用滑模变结构控制使得系统具有鲁棒性强、动态特性好的特点,具有很好的应用前景.文[9]中,采用滑模变结构控制与自适应参数估计实现对 PWM 逆变器的电流控制.在滑动模上,系统状态反复穿越开关面,对参数的摄动、扰动的影响具有不变性,但是当某些未知因素使参数突变,使得滑动条件不再满足时,系统将不具备鲁棒性.为此,系统引入了递推最小二乘法(RLS)进行参数估计.实验结果表明:采用该控制策略使得系统具有鲁棒性强、动态响应好、总谐波损耗低的特点,可以认为该控制方法很理想.文[10]中将带有积分补偿的离散滑模控制器用于 Quantum 串联谐振变换器(QSRC)中,使得变换器的电流波纹减小、输出电压对负载的突变不敏感,从而大大减小了输出滤波器的尺寸、缩短了输出电压的调整时间,获得了最佳输出电压.仿真和实验结果表明了该方法的有效性.文[11]中利用滑模变结构控制串联谐振 DC-DC 变换器,使得系统对输入电压的变化具有很好的鲁棒性,此外,系统很容易实现.文[12]中采用滑模变结构控制全桥 BUCK 变换器产生交流正弦电压,实验结果表明:该方法与传统的 PWM 控制方法相比具有瞬态响应好、鲁棒性强、控制硬件电路简单的优点.为了消除稳态误差,系统中还加入了积分环节.

不间断电源(UPS)和开关电源是电力电子技术在 70 年代末 80 年代初才发展起来的新应用领域,90 年代以来,随着微型计算机工业的迅猛发展,对于 UPS 在数量上的需求越来越大,对其性能要求也越来越高.以往所设计的 UPS 具有很好的静态特性,但它们不能适应于负载突变的场合,因为它们需要很长一段时间才能恢复失真的输出电压.为此,人们用模拟电路设计了带有瞬态反馈的闭环 PWM 逆变器,采用 Deadbeat 控制器来改善 UPS 中 PWM 逆变器的动态响应.但它们都具有某种局限性,如对系统参数敏感、控制电路复杂等.目前,国际上已有学者开始将滑模变结构控制用于 UPS 系统中^[13,14].文[13]运用变结构控制器与降维观测器相结合对 UPS 中的逆变器进行控制,实验结果表明:系统对干扰和参数的变化具有很强的鲁棒性;对功率半导体器件具有过载保护作用;由于采用了降维观测器,所以无需对负载电流进行测量,从而提高了系统的抗噪声度.文[14]对 UPS 提出了

一种带前馈补偿的离散变结构控制器,前馈补偿器改善了系统的稳态特性及跟踪性能,仿真和实验结果表明:系统具有良好的动态品质及稳态特性,并对负载变化具有很强的鲁棒性。

大量研究表明:在电力电子系统中采用滑模变结构控制,使得系统具有瞬态响应好、总的谐波失真小、对参变量及干扰具有很强的鲁棒性等优点。可以预计,随着滑模变结构控制理论研究的不断深入及微型计算机的飞速发展,电力电子系统变结构控制终将走向实用。

3 神经网络控制在电力电子学中的应用(The application of neural network control in power electronics)

神经网络控制是最近发展起来的十分热门的交叉边缘学科,它涉及生物、电子、计算机、数学和物理等学科,有非常广阔的应用背景,它的发展对未来的科学技术的发展将有重要的影响。神经网络就是采用物理可实现的系统来模仿人脑神经细胞的结构和功能的系统,它之所以受到人们的普遍关注,是由于它具有本质的非线性特性、并行处理能力、强鲁棒性以及自组织自学习的能力。因此,对于电力电子这个非线性系统来讲,神经网络控制具有很大的应用潜力。

神经网络是由大量简单的神经元以一定的方式连接而成的。单个神经元的作用是实现输入到输出的一个非线性函数关系,它们之间广泛的连接组合就使得整个神经网络具有了复杂的非线性特性。神经网络将大量的信息隐含在其连接权值上,根据一定的学习算法调节权值,使神经网络实现从 m 维空间到 n 维空间复杂的非线性映射。对于具有非线性的控制对象,特别是当对象的非线性模型不清楚时,应用神经网络可以通过对网络的训练,掌握控制对象的非线性函数关系,从而可给出恰当的控制决策。神经网络发展到现在,人们已经在模型结构、学习算法等方面取得了大量的研究成果,提出了误差反向传播(BP)模型、Hopfield 离散和连续模型、小脑模型、连接控制器(CMAC)模型、径向基函数网络(RBF)模型、Kohonen 自组织特征映射模型、自适应谐振理论(ART)模型、Boltzmann 机、递归神经网络(RNN)模型等很多各具特色的神经网络模型及其计算理论。其中研究得最为成熟,运用得也最为广泛的是误差反传模型,它的网络结构及算法直观、简单。

神经网络控制在电力电子系统中的应用已有少量文献报导^[15~18]。我们知道与常规 PWM 技术相比,电流控制 PWM 技术具有瞬态响应快、精确度高的优点,但在要求更高的场合,其快速性和稳态精度还达不到要求;此外,它在开关模式最佳及负载变化时的稳态性方面还存在着某种局限性。为克服传统控制方法中的局限性,有学者提出了具有学习能力及非线性的神经网络^[15,16]来改善线性电流控制和滞环电流控制的性能。对于线性电流控制,文[15]中用神经网络取代了线性调节器中的 PI 放大器,可以通过自调节增益来补偿各种负载情况下的静态误差,使输出电流最佳。对于滞环电流控制,文[16]采用经离线训练后的神经网络,可以有效地避免干扰及极限环问题。神经网络在预测电流调节器方面还未

得到应用。用神经网络实现的电流控制 PWM,其优点是结构简单、鲁棒性强、精确度高,主要的问题是程序设计时需要花费大量的时间。文[17]利用稀疏神经网络对电压型逆变器进行最优开关模式控制,神经网络用模拟硬件实现,不需要增加微处理器和大容量存储器。理论分析和实验表明:该 PWM 调节器对任何期望的调节指数具有高精度响应。文[18]对电源滤波器提出一种基于神经元的自适应谐波电流检测法。该方法根据信号处理中的自适应噪声抵消原理,利用具有自适应和自学习能力的神经元替代自适应滤波器,该神经元用一对与基波频率相同,相位相差 90° 的正弦量作为输入,其权值用基于 Delta 规则的改进学习方法来调节。仿真结果表明:由该方法组成的检测系统,结构简单,算法容易,便于实现,而且负载发生变化时还可以跟踪检测,具有较高的检测精度。

神经网络控制在电力电子系统中的实用研究处于起步阶段,由于它具有本质的非线性特性、并行处理能力、强鲁棒性以及自组织自学习的能力,因而在研究电力电子这个本质非线性系统中具有广阔的应用前景,必将受到人们越来越多的关注。

4 模糊控制在电力电子学中的应用(The application of fuzzy control in power electronics)

1965 年 Zaden L. A. 发表 Fuzzy Sets 以后,模糊控制作为一门崭新的学科发展非常迅速,应用非常广泛,尤其在需要描绘人类的经验进行判断决策等领域,其应用甚至已超过了理论的发展。近年来,模糊控制已取得了广泛的应用,如机器人控制、飞行控制、汽车速度控制、电梯群管理控制、电力系统的规划、运行、控制及诊断等。目前,国际上已有学者开始将模糊控制应用在电力电子系统中,并取得了一些研究成果。

模型控制是对操作人员的经验加以总结,以模糊数学为工具加以定量化的描述,并按照模糊控制规则实施控制。它避免了建立精确数学模型与复杂系统的矛盾,只需获得丰富的人工控制经验,应用模糊理论和计算机技术,就可对没有准确的数学模型或数学模型极其复杂,一般控制理论不能进行有效控制的系统加以控制。模糊控制主要包括模糊化、模糊推理与模糊判决三部分。其中模糊化将精确测量值转换为模糊语言,用模糊集表示实测的输入值。模糊推理根据已知的控制规则和数据,由已知的模糊输入量推导出相应的模糊控制输出,它是模糊控制器的核心。模糊判决实现由控制输出模糊量到精确量的转换,以得出用于控制的精确输出值。通常的模糊判决所采用的方法有最大隶属度方法、中位数判决方法和加权平均法等。

模糊控制应用于电力电子系统,在国际上已有学者研究。文[19]中将模糊控制用于线性电流 PWM 调节器中,该系统的优点是硬件电路简单,尤其是模糊控制还包含其它系统变量时,如交流传动中的磁通和转矩,其结果相当理想,但设计时需要大量经验。文[20]对 UPS 中的单相 PWM 逆变器提出了一种新的实时数字控制方法,它将 Deadbeat 控制器与模糊补偿器相结合,控制器利用每个采样时刻所测量的状态变

量计算下一个采样时刻逆变器的脉冲宽度,模糊控制器用于补偿由于非线性负载而引起的压降。仿真结果表明:系统具有瞬态响应好、总的谐波失真小、对参数变化及负载突变鲁棒性强的优点。文[21]对 DC-DC 变换器提出了一种通用模糊控制器,基于对被控系统的定性描述,该模糊控制器在参数摄动大时具有响应速度快、稳定性高的特点。此外,它具有通用性,适用于任何 DC-DC 变换器拓扑结构。对 Buck-Boost 及 Sepic 变换器的仿真研究证明了该控制方法的有效性。

电力电子系统具有本质非线性,它的建模是一个十分困难而又没能很好解决的问题。模糊控制最大特点是将专家的控制经验、知识表示成语言控制规则,然后用这些规则去控制系统,不需要对系统进行精确的数学描述,因此模糊控制特别适用于模拟专家对数学模型未知的、复杂的、非线性系统的控制中。已取得的成果表明,它在解决电力电子系统问题上有巨大的潜力,今后在这个领域做更多的研究工作是十分有必要的。特别是将神经网络与模糊控制相结合而构成的模糊神经网络在电力电子学中的应用将更具吸引力。与此俱来的问题是电力电子相对来说一般都具有简单的电路拓扑,而无论是模糊控制或是神经网络控制,它们大都具有相对复杂的结构和算法,如何将二者加以“融合”与“集成”仍是一个值得研究和探索的问题。

5 结束语(Conclusion)

电力电子学作为一门强电与弱电结合的交叉边缘学科正在蓬勃发展着,但在实际应用中还存在着一些缺陷有待克服,它向与它相关的学科,自然也向控制论提出了一系列的问题。作者认为:必须针对电力电子学的特点,如强非线性、双切换频率、极短的瞬态过程等开展建模与控制的系统而深入的研究。目前在国际上将控制论应用于电力电子学处于刚刚起步状态,已取得的成果显示:电力电子学与控制论紧密结合、相互渗透将是一个极具生命力的发展方向。

参考文献(References)

- 1 韩曾晋. 自适应控制. 北京:清华大学出版社,1995
- 2 方少元等. 超声焊机电源及其频率自适应控制系统. 华南理工大学学报,1997,25(3):53-57
- 3 罗世国等. 一种谐波及无功电流的自适应检测方法. 电工技术学报,1993,8(3):42-46
- 4 邓志,吴捷. 一种基于 δ 算子的自校正零极点配置无静差跟踪控制器. 控制理论与应用,1997,14(3):365-369
- 5 Gao Weibing, et al. Variable structure control of nonlinear system: a new approach. IEEE on Industrial Electronics, 1993, 40(1):45-55
- 6 John Y H. Variable structure control: a survey. IEEE on Industrial Electronics, 1993, 40(1):2-22
- 7 Ram Venkataramanan. Sliding mode control of DC-to-DC converter. IEEE IECON'85 Conf., San Francisco, 1985, 251-258
- 8 Malesani L. Performance optimization of cuk converters by sliding mode control. IEEE Trans. Power Electronics, 1995, 10(3):302-309
- 9 Lee J U, et al. Current control of a PWM inverter using sliding mode control and adaptive parameter estimation. IEEE IECON'94 Conf., Bologna, Italy, 1994, 372-377
- 10 Byeong R J, et al. Optimal output voltage control of quantum series resonant converter using integral sliding mode. IEEE IECON'93 Conf., Hawaii, USA, 1993, 869-874
- 11 Boudjema F, et al. Sliding mode-a new way to control series resonant converters. IEEE IECON'90 Conf., California, 1990, 938-943
- 12 Boudjema F, et al. VSS approach to a full bridge buck converter used for AC sine voltage generation. IEEE IECON'89 Conf., Philadelphia, USA, 1989, 82-88
- 13 Pinheiro H, et al. A sliding mode controller in single phase voltage source inverters. IEEE IECON'94 Conf., Bologna, Italy, 1994, 394-398
- 14 Jung Shih-Liang, et al. Discrete sliding mode control of a closed-loop regulated PWM inverter for sinusoidal output waveform synthesis. 1996 自动控制研讨会, 台北县, 台湾, 1996, 503-508
- 15 Ito Y, et al. A digital current controller for a PWM inverter using a neural network and its stability. IEEE PESC'90 Conf., San Francisco, 1990, 219-224
- 16 Harashima F, et al. Application of neural networks to power converter control. IEEE IAS'89 Conf., San Diego, 1990, 1087-1091
- 17 Trzynadlowski A M, et al. Application of neural networks to the optimal control of three-phase voltage-controlled inverters. IEEE Trans. on Power Electronics, 1994, 9(4):397-404
- 18 王群等. 一种基于神经元的自适应谐波电流检测法. 电力系统自动化, 1997, 21(10):13-16
- 19 Min S S, Lee K C, et al. A fuzzy current controller for field-oriented controlled induction machine by fuzzy rule. IEEE PESC'92 Conf., Tolode, 1992, 265-270
- 20 Lin Bor-Ren, et al. Uninterruptible power supply with fuzzy logic approach. IEEE IECON'93 Conf., Hawaii, USA, 1993, 1123-1128
- 21 Paolo Mattavelli, et al. General-purpose fuzzy controller for DC-DC converters. IEEE Trans. on Power Electronics, 1997, 12(1):79-86

本文作者简介

- 刘明建 见本刊 1999 年第 4 期第 473 页。
 吴捷 见本刊 1999 年第 2 期第 308 页。
 薛峰 见本刊 1999 年第 4 期第 473 页。