

控制理论在电力电子学中的应用(上) ——模型与线性化方法

刘明建 吴捷 薛峰

(华南理工大学电力学院·广州, 510640)

摘要: 本文综述了电力电子学中的拓扑网络建模及最优控制和 H_∞ 鲁棒控制在电力电子学中的应用, 并对线性控制理论在电力电子学中的应用前景作出了展望.

关键词: 电力电子; 模型; 最优控制; H_∞ 鲁棒控制

An Overview of Control Theories in Power Electronics

——Model and Linear 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 model of power electronic topology network and the application of optimal control and H_∞ robust control in power electronics, with an emphasis on the potential application of linear control theories in this field.

Key words: power electronics; model; optimal control; H_∞ robust control

1 引言(Introduction)

电力电子学作为研究电力电子技术理论及应用的一门科学正在蓬勃发展着^[1,2,4,6], 它已发展成为一门多学科科技的交叉边缘学科, 并成为高技术领域中的一个技术范畴. 电力电子学包括电力半导体器件、变流电路、电机控制、模拟/数字电子学、控制理论、微型计算机、数字仿真与 CAD 等. 电力电子学的应用非常广泛, 凡是电能的产生、变换、控制、输送和存储等等都离不开电力电子技术^[3]. 其主要应用领域有: 1) 交直流可调电源, 包括: 应用于电子、计算机、精密仪器器和航天领域的各种开关调节型交直流电源; 2) 电力系统中的应用, 包括: 有源电力滤波器、静止型动态无功补偿、高压直流输电、风力发电、同步发电机励磁系统调节及控制等等; 3) 电气传动控制中的应用^[5], 包括: 直流电机调速及控制、异步及同步电动机的调速及控制, 步进电机控制等等; 4) 其它工业中的应用, 包括: 电加热和电照明控制技术、感应加热电源和焊接电源、光电池和燃料电池的变换、太阳能逆变器、电化学生产等等. 正是由于电力电子学应用的广泛性, 使得研究电力电子系统的动态品质、稳定性、鲁棒性等具有特别重要的意义, 而利用控制论是一种非常有效的方法.

控制理论在电力电子学中的应用可分为两大类. 第一类是控制理论与电力电子学的某些具体应用领域相结合, 如控制理论在机器人、电力系统、电气传动中的应用. 在这类应用研究中, 研究者是从全局的、系统的角度应用控制理论来提高或改善系统的特性, 而电力电子电路则常常被近似线性化, 并视为一个简单环节, 如一个等价增益, 或附加一个饱和

(限幅)特性等. 电力电子本身的非线性, 尤其是动态非线性往往被忽略了. 有关这方面的研究, 已有大量文献报导, 如本文作者之一在《中国电机工程学报》(1998 年第 6 期)发表了题为“现代控制技术在电力系统控制中的应用”一文. 如何将电力电子器件作为一个非线性环节, 并研究其对整个控制系统的影响, 目前只见到一些个别的研究实例. 如 Landau I-D 在他的早期著作中 (Landau I-D, “Adaptive Control—the Model Reference Approach”, New York) 曾报道过关于晶闸管在直流传动中触发时延对系统工作的影响. 第二类是控制理论应用于提高和改善电力电子电路本身的某些性能. 这类研究是对电力电子电路的拓扑结构进行建模, 将它视为一个动态非线性系统并计及其负荷特性, 利用控制理论来改善它的某些特性. 本文研究的对象是电力电子电路拓扑本身, 属于控制理论在电力电子学中应用的第二类.

近年来随着微电子技术的迅速发展, 高精度、高速微处理器的出现, 使复杂的参量和系统状态实时计算或估计成为可能, 并且使自适应控制、滑模变结构控制、最优控制、 H_∞ 鲁棒控制等现代控制理论及模糊控制、神经网络等智能控制能够应用于电力电子系统. 在设计高性能、高精度、强鲁棒性的电力电子系统时, 使用控制论将是极具吸引力和有前途的. 目前国际上这方面的研究处于刚刚起步的状态^[7], 本文根据大量文献报道以控制理论体系作为脉络, 对上述研究加以系统化, 结合作者的观点综述了电力电子学中的控制论方法, 并对控制理论应用于电力电子学的前景作出了展望. 全文分为上下两部分, 第一部分为模型与线性化方法, 第二部分为

非线性与智能化方法。

2 电力电子拓扑网络建模(The model of power electronic topology network)

将控制论用于电力电子电路控制的前提是对它的网络拓扑进行建模,但是由于电力电子电路的非线性时变特性和网络拓扑结构的复杂性,使得对它的建模成为一个十分困难而又没能很好解决的问题,对它建模方法的研究在国际上一直是热门的课题。

PWM 变流电路具有电路结构简单、输出电压波形好,并能抑制或消除谐波的特点,使它在低频领域获得了广泛的应用^[8],此外 PWM 技术在变换器、逆变器中的应用对近代电力电子技术、近代交流调速系统的发展起到了极大的促进作用,并成为电力电子学中一个非常重要的组成部分。目前对这类电力电子电路的建模方法有状态空间平均法^[9]、数据采集建模法^[10]、符号分析法^[11]、PWM 开关平均法^[12]等,但 these 方法大都针对性强,有很大的局限性,如只适用于中低频电路,或只适用于小信号电路,以及某个具体电路或状态等。其中, PWM 开关平均法的基本思想是将变换器中的 PWM 开关用平均模型替代,其突出优点是避免了小信号假设、适用范围广,是一种非线性、大信号平均模型。此外,它另一个优点是用 PWM 开关平均法建立的模型直接与原变换器电路相对应,仅仅是将开关用相关模型代替,变换器的所有支路电流、节点电压均可以直接用于该模型。因此,利用该方法可以简单、方便地建立 DC-DC 变换器的模型。它的局限性与状态平均法一样,即变换器的开关周期要小于变换器的时间常数,该方法能否推广到谐振开关变换器有待进一步的研究和探讨。研究一种适用范围广、具有普遍意义的统一建模方法具有重大的理论和实际意义。

众所周知, PWM 变流电路中电力电子开关器件是在高电压下导通,大电流下关断,处于硬性开关状态。这种硬开关转换导致了巨大的开关损耗、开关噪声,在高频情况下尤其严重。为此,1989 年美国的 Divan D M 博士提出了谐振软开关这一新概念,此概念一出现就显示了蓬勃的生命力。谐振软开关变流器使功率开关器件在零电压或零电流条件下开关,它有效地解决了高频下开关损耗变大的问题。但在谐振软开关变流器中,由于谐振频率与开关频率接近,因而线性波纹近似条件不再成立,这类变流器的建模变得更加复杂和困难。目前对这类电力电子电路的建模方法有改进的状态空间平均法^[13]、等效电路模型法^[14]、工作波形平均法^[15]等,但 these 方法大都也有针对性强的弱点,如文献^[14]中,等效电路模型法是将变流器的晶体管和二极管是一个三端元件等效替换,得出拓扑不变的等效电路再进行分析。它的处理具有简单、物理意义鲜明的优点,但这种等效对原电路的结构有所限制,且得出的状态方程阶数较高,不便于处理。文献^[15]中,采用改进的状态空间平均法将状态变量区分为快变量和慢变量,首先得到快变量的闭合解并将其消去,然后对慢变量进行平均,但该方法完全是数学方程的处理,缺乏鲜明的物理意义。

目前电力电子拓扑网络建模的趋势是统一建模方法的研究。如已有学者采用高频网络平均法^[16]对谐振软开关变流器进行统一建模。此外,文献^[17]提出了一种能通用于 PWM 型、准谐振型、桥式串(并)联谐振型等各类 DC-DC 开关变流器的统一建模方法——脉冲波形积分法。脉冲波形积分法通过建立变流器的统一拓扑,对小信号采样函数进行拉氏变换,以及按变流器的类型作相应线性近似处理等三项有效措施,将各类变流器的建模统一起来。这种建模的思想具有很好的指导意义,能否将它进一步地推广,尚有待继续探讨。

借助于现代控制论的系统建模方法,对电力电子拓扑网络进行建模研究将是一条有效途径。现在已有学者证明了 PWM 开环控制与滑模变结构控制的等效控制等价^[18],文^[19]则应用滑模变结构控制理论对峰值电流反馈的 Boost 变换器建立闭环模型,比从电路理论角度建立的模型要精确。

3 最优控制在电力电子学中的应用(The application of optimal control in power electronics)

最优控制是在 50 年代随着空间技术的迫切需要而发展起来的,它是现代控制理论的重要组成部分之一,也是目前诸多现代控制理论中应用最多,最成熟的一个分支。最优控制已成功地应用于许多领域,如航空、航天、航海的制导、导航和控制,电力系统中发电机组的综合控制,发电机制动电阻的最优时间控制等,目前它已开始应用于电力电子系统的控制。

对一般线性最优控制系统可有如下提法,控制系统

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + B(t)U(t), \quad X \in \mathbb{R}^n, \quad U \in \mathbb{R}^r, \\ A(t) - n \times n \text{ 阶矩阵}, B(t) - n \times r \text{ 阶矩阵}.$$

性能指标:

$$J = K[X(t_f), t_f] + \int_0^{t_f} [L(x(t)), u(t), t] dt,$$

t_f —终端时刻, $X(t_f)$ —终端状态, 目标集 $\Phi[X(t_f), t_f] = 0$ 。

由此最优控制问题可表述为:求一允许控制 $U(t)$ 使系统由初始状态 $X(t_0)$ 出发在时间间隔 $[t_0, t_f]$ 内,到达目标集 $\Phi[X(t_f), t_f] = 0$,并使性能指标 J 为最小。对最优控制求解问题主要有变分法和最大值原理两种方法。如果性能指标采用二次型性能指标 $J = \frac{1}{2} \int_0^\infty (X^T Q X + U^T R U) dt$ (式中 R, Q 分别为状态量与控制量的权阵),则最优控制系统的设计转化为从黎卡提方程 $A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0$ 中解出 P 阵从而得到最优控制律 $U^* = -R^{-1}B^T(t)P(t)X(t)$ 的问题。对二次性能指标如何选择权阵 R, Q 是较困难的一项工作,如选择不同的 R, Q ,那么其最优控制则是针对由该 R, Q 所确定的性能指标而言的。因此,如何恰当地选择权阵 R, Q 是最优控制设计中需注意的问题。

在最优控制中代价函数的选取直接表明了设计者的控制目的。若选时间,则为时间最优控制;若选动态性能,则为动态性能最优控制;若选谐波损耗,则为谐波损耗最优控制,所以最优控制在电力电子系统中具有很广阔的应用空间。文

[20] 针对他激式 PWM 型开关电源的开环特性不稳定的问题,采用最优控制理论对他激式 PWM 型开关电源闭环特性进行校正,从而使系统的动态性能最佳.文[20]中建立了“二次型性能指标”权值 q 与系统动态指标 σ_p, t_s 及阻尼比 ζ 间的解析关系,并给出了设计与实现开关电源最好闭环传递函数的方法.实验研究表明:采用最优控制使 PWM 型开关电源系统获得了优良的动态性能.我们知道,在电力电子系统中存在大量的开关型控制,产生了大量谐波.谐波的存在使得系统效率降低、负载发热、产生噪声及振动,所以谐波的抑制是一个重要问题.文[21]针对谐波抑制问题,提出三相 PWM 逆变器的最优控制策略,使逆变器的谐波损耗最小.实验结果表明:对三相 PWM 逆变器实现谐波损耗最优控制,大大降低了电机的谐波损耗.众所周知,谐振式变换器^[23,24]与传统 PWM 变换器比具有很多优点^[25,26],然而由于采用了高频谐振回路使得谐振变换器工作更加复杂、控制更加困难.以往主要的控制策略有:Delta 调制^[27]、 $\Sigma\Delta$ 调制的离散脉冲调制^[28]、最优离散脉冲调制^[29]等,这些控制策略各有其优点,但对于要求具有动态品质好、电流脉动小、对参数变化和负载干扰具不敏感性的应用场合,它们都存在某些局限性.为此,[22]中提出了一种新型状态反馈控制用于改善谐振变换器的静态、动态特性.实验结果表明该方法使系统不仅具有优良的静态和动态特性,而且对系统工作点的变化不敏感.

应当指出,最优控制是从精确的数学模型计算出来的,当模型存在偏差将严重影响系统的性能,使品质恶化,因此有必要解决鲁棒闭环算法问题.

4 H_∞ 鲁棒控制在电力电子学中的应用(The application of H_∞ robust control to power electronics)

1981 年 Zames 首次用明确的数学语言描述了基于经典设计理论的优化设计问题,提出用传递函数阵的 H_∞ 范数来记述优化指标.1984 年 Francis 和 Zames 用古典的函数插值理论,提出了 H_∞ 设计问题的最初解法,同时,基于算子理论等现代数学工具,这一解法被很快推广到一般的多变量系统.而 Glover 则将 H_∞ 的设计问题归纳为函数逼近问题,并用 Hankel 算子理论给出了该问题的解析解. Glover 的解法又被 Doyle 在状态空间上进行了整理并系统地归纳为 H_∞ 控制问题.至此 H_∞ 控制理论已经初步形成. H_∞ 控制可简单地归纳如下:

对线性系统

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + BU + PW, \quad X \in \mathbb{R}^n, \quad U \in \mathbb{R}^m, \\ e &= CX + QW, \quad W \in \mathbb{R}^r, \quad e \in \mathbb{R}^l, \end{aligned}$$

设在 $W = 0$ 时系统是稳定的,且 $Z = [e \quad U]^T$. 传递函数矩阵 $T_{ZW}(s)$ 的 H_∞ 范数为

$$\|T_{ZW}\|_\infty = \sup_{0 \leq \omega < \infty} \sup_{w_0 \in \mathbb{R}^r} \frac{\|T_{ZW}(j\omega)W_0\|}{\|W_0\|},$$

$W_0 = [w_{01}, w_{02}, \dots, w_{0r}]^T$ 为各次干扰谐波的幅值向量.如果有一控制策略 U^* 使 $H_\infty = \|T_{ZW}\|_\infty \leq \gamma, \gamma > 0$ 为一足够小的正数,则称 U 是 H_∞ 最优控制.可以看出,在出现不确定因素时, H_∞ 鲁棒控制不仅可保证稳定性,而且可获得大的稳

定裕度.

对仿射非线性系统

$$\begin{aligned} \dot{X} &= f(X) + g_1(X)W + g_2(X)U, \\ Z &= h(X) + K(X)U, \\ X &\in \mathbb{R}^n, \quad U \in \mathbb{R}^m, \quad W \in \mathbb{R}^r, \end{aligned}$$

寻求一个控制 U^* ,使得: 1) 在 $X = 0$ 闭环系统是渐进稳定的(即允许控制); 2) 使上述系统的以 W 为输入, 罚函数向量 Z 为输出的系统满足下列不等式

$$\int_0^T (\|Z(t)\|^2 - \gamma^2 \|W(t)\|^2) \leq 0,$$

则该系统即称为非线性 H_∞ 控制系统或非线性鲁棒控制系统.可以看出,以上积分式体现了系统的输入对输出的影响限制的一个“满意程度”.

H_∞ 鲁棒控制不仅具有处理多变量问题的能力,而且与线性二次高斯最优控制不同,它可解决具有建模误差,参数不确定和干扰未知系统的控制问题,并直接解决鲁棒控制问题. H_∞ 算法具有较好的直观性及严格的数学基础.此外, H_∞ 控制经较简单的运算便可使系统具有良好的性能.在 H_∞ 控制的应用上,目前主要还是线性系统及仿射非线性系统.

H_∞ 鲁棒控制在研究具有强鲁棒性的稳定控制中占有重要地位,已成为控制论中的一个引人注目的分支. H_∞ 鲁棒控制已成功地应用于对稳定性要求极高的电力系统中,它在电力电子学中的应用研究则刚刚开始. Rami Naim 等人在文[30]中利用 H_∞ 鲁棒控制对 Boost 变换器进行了研究.文中指出 PWM 变换器中的控制器应当在输入电压、输出负载扰动时,能使系统稳定并保证输出电压为定值,但是 Boost 变换器占空度与输出电压的传递函数有右半平面零点,这使它很难达到前述要求,因此文[30]利用 H_∞ 鲁棒控制理论,通过解两个代数 Riccati 方程设计了控制器. H_∞ 控制器与变换器有相同的阶次,而且直流增益小.实验结果表明:采用 H_∞ 最优控制器使系统在较宽的频带范围内具有很强的鲁棒性.此外,文[30]还给出了三个权函数下, H_∞ 控制器对干扰的抑制曲线,但对权函数的选取未作进一步的研究.

H_∞ 鲁棒控制在电力电子系统中的应用研究虽然刚刚起步,但可以预计它将会在这一领域获得广泛的应用.因为 FACTS(灵活交流输电系统)是现代电力系统具变革性的前沿课题,电力电子系统在 FACTS 中占重要地位, FACTS 中的电力电子系统必须稳定性高、鲁棒性强,而 H_∞ 鲁棒控制是直接解决这一问题的强有力手段.

参考文献(References)

- 1 Bose B K. 电力电子学——一门勃然兴起的技术. 国外电力电子技术, 1993, (3): 1-7
- 2 余萃等. 国外电力电子技术发展综述. 电力电子技术, 1992, (5): 50-55
- 3 丁道宏. 电力电子技术. 北京: 机械工业出版社, 1992
- 4 Bose B K. Recent advances in power electronics. IEEE Trans. Power Electronics, 1992, 17(1): 2-16

- 5 Fumio Harashima. Power electronics and motion control. Proceedings of IEEE, 1994, 82(8): 1107 - 1111
- 6 Bose B K. Power electronics —— a technology review. Proceedings of IEEE, 1992, 80(8): 1303 - 1334
- 7 钱照明等. 电力电子技术及其应用的最新发展(二). 中国电机工程学报, 1998, 18(3): 153 - 159
- 8 Holtz J. Pulsewidth modulation —— a survey. IEEE Trans. Industrial Electronics, 1992, 39(5): 410 - 420
- 9 Middlebrook R D et al. A general unified approach to modeling switching converter power stage. Int. J. Electronics, 1977, 42(6): 521 - 550
- 10 Huliel H. Low frequency sampled-data models of switched mode DC-DC converter. IEEE Trans. Power Electronics, 1991, 6(1): 55 - 61
- 11 林波涛等. PWM 开关变换器的符号分析. 电子学报, 1996, 24(9): 83 - 87
- 12 Edwin Van Dijk et al. PWM-switch modeling of DC-DC converters. IEEE Trans. Power Electronics, 1995, 10(6): 659 - 665
- 13 Ninomiya V et al. A unified analysis of resonant converter. IEEE Trans. Power Electronics, 1991, 6(2): 260 - 270
- 14 Vorperian T et al. Equivalent circuit models for resonant and PWM switches. IEEE Trans. Power Electronics, 1989, 4(2): 205 - 213
- 15 高潮等. 准谐振及 PWM 型变流器开关工作波形平均建模法. 电工技术学报, 1996, 11(1): 38 - 42
- 16 林波涛等. 一种统一的准谐振开关变换器的等效电路分析法——高频网络平均法. 电子学报, 1995, 23(8): 71 - 74
- 17 高潮等. 直流电一直流电开关变流器的统一建模方法. 电子学报, 1995, 23(2): 53 - 58
- 18 H Sira-Ramirez. Sliding-mode control on slow manifolds of DC-DC power converters. Int. J. Control, 1988, 1323 - 1340
- 19 R M Bass et al. Average modelling of current-mode controlled converter: instability predictions. Int. J. Electronics, 1994, 613 - 628
- 20 付永庆等. 开关稳压电源动态性能的最优化设计研究. 仪器仪表学报, 1997, 18(6): 617 - 621
- 21 Sandor Halasz et al. Optimal control of three-level PWM inverter. IEEE Trans. Industry Electronics, 1997, 44(1): 96 - 106
- 22 Mam Go Kim et al. A new state feedback control of resonant converters. IEEE Trans. Industry Electronics, 1991, 38(3): 173 - 179
- 23 萧岚等. 升降压式软开关 DC-DC 变换器的研究. 电力电子技术, 1997(2): 16 - 32
- 24 何志伟. 结型谐振直流环节逆变器的分析和研究. 华南理工大学学报, 1997, 25(4): 77 - 82
- 25 王聪. 软开关逆变电路及其应用. 北京: 机械工业出版社, 1993
- 26 Hua Guichao and Fred C Lee. Soft-switching techniques in PWM converters. IEEE IECON'93 Conf., Hawaii, USA, 1993, 637 - 643
- 27 Kheraluwala M et al. Delta modulation strategies for resonant link inverter. IEEE PESC'87 Conf., New York, 1987, 271 - 278
- 28 Thomas G Habetler et al. Performance characterization of a new discrete pulse modulation current regulator. IEEE Trans. Industry Application, 1989, 25(6): 1139 - 1148
- 29 Kheraluwala M et al. Optimal discrete pulse-modulation waveforms for resonant link inverter. IEEE PESC'88 Conf., New York, 1988, 567 - 574
- 30 Rami Naim et al. H_{∞} control applied to boost power converter. IEEE Trans. Power Electronics, 1997, 12(4): 677 - 683

本文作者简介

刘明建 女, 1964 年生, 博士生. 1987 年及 1990 年毕业于湖南大学, 分别获工学学士、工学硕士学位. 研究方向为: 控制理论在电力电子学中的应用.

吴捷 见本刊 1999 年第 2 期第 308 页.

薛峰 1973 年生, 博士生. 1993 年及 1996 年毕业于华南理工大学, 分别获工学学士、工学硕士学位. 研究方向为: 交流电机调速, 控制理论在电力电子学中的应用.