

有源电力滤波器常用控制策略的分析比较

邵振华, 彭仁崇

(福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要: 针对有源电力滤波器 (APF) 的控制, 将几种适用于有源滤波控制算法进行对比分析, 简要介绍了比例积分控制、滞环控制、无差拍控制、三角波调制、单周控制、空间矢量控制、变结构控制及滑模控制、重复控制、预测控制、模糊控制等几种目前应用较为广泛的控制策略。在分析其工作原理的同时, 指出各自的优缺点和应用范围, 并对部分控制算法的发展方向进行了探讨性阐述。

关键词: 有源电力滤波器; 控制策略; 无功补偿

中图分类号: TM 76

文献标识码: A

Comparisons of several control strategy on active power filter

SHAO Zhen-hua PENG Ren-chong

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract Considering the control of the active power filter (APF), the comparison and analysis of several control strategies on active power filter is proposed in this paper. Several novel control strategies widely used at present have been introduced briefly (PI control, hysteresis control, dead beat control, SPWM control, one-cycle control, space vector control, variable structure control and sliding mode control, repetitive control, predicted control, fuzzy control). Furthermore, their individual advantages and disadvantages, available scope, development orientation also have been indicated.

Keywords active power filter, control strategy, reactive power compensator

1 引言

有源滤波器能够成为谐波治理的首选方案和发展方向是因为它相对于无源滤波器而言, 是一种动态、灵活的谐波治理手段, 而这种优良的性能正是由实时控制实现的。有源滤波器能够按照其工作原理达到预期的谐波治理效果, 除了系统电路设计合理外, 在很大程度上还依赖于控制器的性能^[1]。

有源滤波器 APF 的控制本质上是对 PWM 逆变器的控制, 最终归结到求取逆变器的开关模式。通过对开关模式的控制, 使逆变器的输出相应的电压或电流跟踪期望的参考电压或电流, 从而根据 APF 的工作原理, 达到实现谐波治理的目的。

为了能够更好的抑制高次谐波补偿无功功率, 加速电网谐波和无功率的快速准确检测, 许多控制算法应运而生, 有源滤波的常见控制算法有: 比例-积分控制法、滞环控制法 (Delta 控制、死区控制、棒-棒控制都可以称为滞环控制)^[2]、无差拍控制法、三角波调制法、单周控制、空间矢量控制、变结构控制及滑模控制、重复控制、预测控制、模糊控制等。

2 有源电力滤波器常用控制策略的分析比较

2.1 多模递推比例-积分控制法和改进的比例-积分-微分控制法

比例调节的作用是按照比例反映系统的偏差。积分的作用是用来消除系统的稳态误差。一般分为电压有效值反馈和瞬时值反馈两种形式的 PI 控制。PI 控制由于形式简单、参数容易设计、理论成熟等特点

收稿日期: 2008-06-13

作者简介: 邵振华 (1979-), 男, 硕士研究生。

已经广泛应用于各种领域。但是,为了保证系统的稳定性,控制器的比例 P 必须加以限制,使得控制系统的动态性能一般,系统对非线性在扰动的抑制效果不好,而且对于正弦信号,PI控制器不能实现无静差跟随,输出电压的稳态精度受到影响。文献[3]为了消除系统的稳态误差、提高系统的动态性能,提出了一种采用预测模型实现的多模比例-积分-微分(PID)控制法。实验结果表明,这种系统具有控制精度高和鲁棒性强的特点,但是控制器的 K_P 、 K_D 、 K_I 是用离线试凑法计算得出,实时性和普及性推广受到影响。文献[4]中指出,为了保证系统的稳态精度,通常使用PI控制(内环)加电压均值反馈(外环)来保证系统的精度。

2.2 滞环控制法

滞环电流控制是一种简单的 bang-bang 控制,工作原理是功率开关电流的反馈信号与给定电流的上下限进行比较,交点作为功率开关的开关点。每个开关周期内,功率开关的导通时间、截止时间和开关频率都会变化。它是一种变频 PFM(脉频调制)峰谷值电流控制技术,也叫电流控制两态调制技术。

一般说来,滞环控制的特点是:两态调制,同时具有脉宽和脉频调制的特点;滞环电流控制定位于电流的暂态控制,算法简单,具有动态相应快、鲁棒性好的优点。但是其开关频率不固定,高频纹波的幅度相对也大些。此外,滞环电流控制输出频谱范围宽,滤波较困难。

2.3 无差拍控制法

无差拍控制是在控制对象离散化的基础上,根据逆变器系统的状态方程和输出反馈信号来计算下一个采样周期的脉冲宽度。其优势在于极高的动态性能,输出能够很好的跟踪给定值,波形畸变小,易于计算机执行(对硬件有一定的要求)。但是,该算法对系统的数学模型精度要求高,当数学模型和实际对象有差异的时候,不但达不到好的控制效果,还会造成输出性能恶化甚至系统不稳定,危害逆变器的安全运行。此外,该算法计算量大,对系统参数的依赖性较大,鲁棒性差等。这些缺点会使被补偿量的预测周期增大,并易引起较大的预测误差,最终影响补偿特性。无差拍控制是一种优点和缺点都十分突出的控制方式。针对计算延时和直流电压利用率问题,可以采用状态观测器或者结合预测控制,将控制作用提前一拍来解决。文献[5]中在串联有源滤波器中采用无差拍控制,充分利用了无差拍控制动态响应好、跟踪无过冲的优点。仿真结果表明,无差拍控制的电力有源滤波器的输出可以很好地跟踪参考谐波电压信号,使负载端的电压波形接近于正弦波,即使在开关频率比较低的情况下也有着良好的动静态响应。

2.4 三角波载波控制法

SPWM(Sinusoidal PWM)法是一种比较成熟、目前使用较广泛的 PWM 法。采样控制理论中的一个重要结论:冲量相等而形状不同的窄脉冲加在具有惯性的环节上时,其效果基本相同。SPWM 法就是以该结论为理论基础,用脉冲宽度按正弦规律变化而和正弦波等效的 PWM 波形即 SPWM 波形控制逆变电路中开关器件的通断,使其输出的脉冲电压的面积与所希望输出的正弦波在相应区间内的面积相等,通过改变调制波的频率和幅值调节逆变电路输出电压的频率和幅值。

三角波载波 PWM 控制技术分为以下几类:基于正弦波对三角波调制的 SPWM 技术、消除特定谐波 PWM 技术(HEPWM)、开关频率最优 PWM 技术(SFOPWM)、三角波移相 PWM 技术(PSPWM)及三角波载波移相开关频率最优 PWM 技术(PSSFOPWM)等。

2.5 单周控制法(积分复位控制)

单周控制法是一种新型非线性控制技术,其基本思想是控制开关占空比,在每个周期使开关变量的平均值与控制参考电压相等或成一定比例。该技术同时具有调制和控制的双重性,通过复位开关、积分器、触发电路、比较器达到跟踪指令信号的目的。

单周控制的特点:单周控制在控制电路中不需要误差综合,它能在一个周期内自动消除稳态、瞬态误差,使前一周期的误差不会带到下一周期。虽然硬件电路较复杂,但其克服了传统的 PWM 控制方法的不足,适用于各种脉宽调制软开关逆变器,具有反应快、开关频率恒定、鲁棒性强等优点。此外,单周控制还能优化系统响应、减小畸变和抑制电源干扰,是一种很有前途的控制方法。文献[6]指出:单周控制技术抗输入信号的扰动能力比抗负载的扰动强,其动态性能优于电压型、电流型瞬时值控制技术,但是经滤波器后输出电压的稳态精度不及电压型、电流型瞬时值控制技术。文献[7]提出了一种常频控制的高效积

分复位控制. 试验结果表明, 输入电流波形能够很好的跟踪输出电压波形, 达到了很好的控制效果, 提高了逆变器的效率.

2.6 空间矢量控制法

空间矢量控制是建立在交流异步电机磁场理论基础上的控制策略. 它是将三相整流器作为一个整体来考虑, 同过控制与参考矢量最接近的三个开关的导通时间, 使得一个控制周期内开关矢量输出的平均效果与参考矢量相等. 其基本思想是在矢量空间中用有限的静止矢量去合成和跟踪调制波的空间旋转矢量.

空间矢量控制法的基本特点有: SVPWM 对直流电压的利用率高, 比常规的 SPWM 技术, 极限输出电压提高 15.47%^[8]; 它本质也是一种多电平逆变器控制技术, 电压矢量的密集程度、模态的选择种类多少都将影响控制的精度以及输出电压的谐波程度. 一般说来, 控制精度越高、输出电压谐波越小, 控制上越复杂. 当采用不连续开关方式调制时, 开关器件的开关损耗可以达到最小. 文献[6]指出, 当空间电压矢量 PWM 控制技术用于五电平以上的逆变器时, 其控制算法将异常复杂. 文献[9]中根据五相逆变器的结构特点, 在传统的最近两矢量 SVPWM (NTV-SPWM) 控制的基础上, 提出了新的五相逆变器 SVPWM 控制方式: 最近四矢量 SVPWM (NFV-SPWM) 控制和最小开关损耗 SVPWM 控制. 通过对比分析知, 传统的两矢量 SVPWM 控制含有较大的低次谐波, 不适用于多相控制; 最近四矢量的 SVPWM 控制输出谐波最小, 适用于低调制指数区. 最小开关损耗 SVPWM 控制在一个周期内开关次数最少, 同样开关损耗最小, 适用于高调制指数区.

2.7 变结构控制和滑模控制法

所谓变结构是指在系统工作中, 根据运行参数的变化使系统中环节之间的联结方式发生变化, 或者某些信号的极性发生变化, 具有这类特征的控制系统均可以称之为变结构控制系统.

利用控制的不连续性, 依靠高频转换强制闭环系统到达并保持在所设计的滑动面上. 在一定条件下, 滑动模对于系统的干扰和系统参数的变化具有不变性.

滑模控制的特点为: 滑模变结构控制系统的最大优点是其对参数变化和外部扰动不敏感, 具有强鲁棒性, 而且其固有开关特性很适合逆变电源的控制. 高频颤动是滑模控制的一大缺点. 高频颤动的危害: 滑模控制的不连续开关特性容易引起系统的颤动, 这种颤动容易激励系统中的高频部分, 使系统不稳定. 为了避免这种高频颤动, 文献[10]中将功率开关的切换采取“柔化”处理, 在考虑功率器件工作频率上限的基础上, 采用延迟的方法变相的降低了功率开关的工作频率. 试验结果输出了理想的正弦波形体现了良好的动态和稳态响应, 滑模控制的鲁棒性使逆变器获得了良好的性能.

滑模控制具有快速性和强鲁棒性的特点, 但在实际应用中还是存在一些问题. 首先是逆变系统的理想滑模切面很难选取; 其次, 滑模变结构只有采用数字形式实现才能具有较大的应用价值, 而只需要足够的采样频率, 理论上和实际上的诸多困难, 限制了滑模控制在实际产品中的应用.

2.8 重复控制法

重复性控制的基本思想是假定前一周出现的基波波形畸变将在下一基波周期的同一时间重复出现, 控制器根据给定信号和反馈信号的误差来确定所需要的校正信号, 然后在下一个基波周期的同一时间将此信号叠加到原控制信号上, 以消除后面各周期中出现的重复性畸变. 其特点为重复性控制使系统获得了很好的静态性能, 而且易于实现, 但是该技术却不能够获得很好的动态性能. 重复控制要求扰动信号是时间的周期函数, 所以对于实际运行是随机波动的系统, 直接应用重复控制的效果并不理想, 但是对于具有周期性扰动的系统, 诸如整流型负载等效果就比较理想. 重复控制器在机械、铸造、机械人、卫星姿态控制以及硬盘磁头定位等领域得到了广泛的应用.

当前重复控制理论的研究主要集中在二方面^[4]: 新的重复控制器设计方法; 参考信号或者扰动信号为变周期信号的重复控制理论. 在电力电子方面, 由于分析和设计方法的滞后, 并不适用于有源滤波系统, 设计的控制器性能与理论预期还有一定的差距.

2.9 预测控制法

预测控制是建立在预测模型、滚动优化和反馈校正三大本质特征基础上的基于模型的控制算法. 在

预测控制中需要建立被控对象的模型, 利用当前和先前的信息预测未来的输出。

预测控制是一种优化控制策略, 它是通过使系统的某一性能指标达到最优来确定未来的控制作用, 其特点为形式多样灵活, 控制应用广泛。在预测控制中只要能够预测被控对象的未来输出, 就可以作为预测模型。因此, 传递函数和状态方程这种传统的数学模型可以作为预测模型; 而对于那些难以建立数学模型的复杂系统, 也可以用阶跃相应和脉冲相应等非参数模型直接作为预测模型。此外, 预测控制不同于传统意义上的最优控制, 预测控制是有限时段上的滚动优化。它的评价指标不是一个全局固定的优化性能指标, 而是在采样时段内信息计算局部的优化性能指标, 从而控制下一时刻的输出, 因此, 会出现由于模型误差或者系统参数变化而引起的模型失配。因此预测控制往往用反馈控制来校正上述误差。

文献 [11] 将预测控制应用于电力有源滤波器, 实际控制中采用了输出预测误差和控制量加权的二次性能指标来决定最优控制。试验结果表明了预测控制可以取得了较高的精度和动态相应性能, 避免了传统 PI 控制稳态精度不高、滞环控制开关控制频率不固定的问题。

2.10 模糊控制法

模糊控制属于智能控制的范畴, 它有不依赖控制对象数学模型的特点。这一特点对于具有多变量非线性时变特性的电力电子装置而言, 模糊控制系统很容易解决系统复杂性与模型精确性之间的矛盾。主要包括模糊化处理、模糊推理和模糊判决三部分组成。一般说来, 只要获得丰富的人工控制经验, 模糊控制系统比较适合非线性、时变、滞后系统的控制。

将模糊控制应用于逆变器, 具有如下特点: 模糊控制器的设计不需要控制对象的精确数学模型, 具有较强的鲁棒性和自适应性; 查找模糊控制表只需要占用处理器很少的时间, 提高系统的采样率可以补偿模糊规则 and 实际经验的偏差。

文献 [12] 在递推 PI 控制的基础上, 将相应的模糊控制策略应用于三相 VSCC 型 PWM 整流器有源滤波控制系统, 可以在不必分析获知电源电流谐波分量的条件下, 实现电源电流有源滤波器和整流器的双重功能。与常规的 PI 控制对比可知, 该系统具有电源功率因数补偿的作用, 而且该系统没有复杂的数学计算, 使得系统结构简单, 动态相应效果较好。文献 [13] 针对高压大容量系统中控制策略相对复杂的特点提出了分频控制的观点, 同时采用一种基于广义积分的模糊参数自整定 PI 控制算法, 取得了较好的控制效果。控制理论已经证明, 模糊控制可以以任意精度逼近任何非线性函数。但是, 由于受到技术水平的限制, 模糊变量的分档和模糊规则制定都需要大量的实际经验和控制对象的充分了解, 这些都牵扯到一定的人为因素, 因此模糊控制理论还有待进一步发展和完善。

3 结语

通过上面的分析对比可以看出, 有源滤波器的控制算法很多, 但是各种算法都有自身的优点和不足, 都有自己适用的范围。改善波形质量、降低开关损耗、提高电压的利用率一直是提高 PWM 控制效果的主要方向。一般说来, 优化控制策略和实施复杂控制是控制算法的主要研究方向, 算法简单、较强的鲁棒性、良好的稳定性和快速的动态相应与稳态特性, 一直是评价算法优劣要考虑的因素。但是, 针对不同的控制对象, 就要因地制宜的采用不同的控制策略, 才能取得预期的效果。随着控制器件和各种控制理论不断发展, 还会有更多更好的控制策略涌现出来 [14]。

参考文献:

- [1] 王兆安, 杨君等. 谐波抑制和无功功率补偿 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [2] 刘红萍, 张代润. 有源电力滤波器的正弦滞环控制法研究 - 滞环控制策略分析 [J]. 四川联合大学学报: 工程科学版, 1997, 3(4): 103-110.
- [3] 荣飞, 罗安. 改进比例 - 积分 - 微分控制方法在无功补偿和混合滤波综合补偿系统中的应用 [J]. 电网技术, 2007, 31(13): 34-38.
- [4] 陈宏. 基于重复控制理论的逆变电源控制技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2003.
- [5] 李玉梅, 马伟明. 无差拍控制在串联电力有源滤波器中的应用研究 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(8): 28-31.
- [6] 陈道炼. DC-AC 逆变技术及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

- [7] 郭卫农, 陈 坚. 基于状态观测器的逆变器数字双环控制技术研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 64- 68
- [8] 周以荣, 李霄燕. 空间矢量控制法在有源滤波器中的应用 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2002, 7(1): 33- 36
- [9] 于飞, 张晓锋. 五相逆变器的空间矢量 PWM 控制 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 40- 46
- [10] 马 皓, 韩思亮. 新型滑模控制功率放大器 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2005, 39(11): 1 081- 1 086
- [11] 吴 勇, 万淑芸. 基于预测控制的并联有源电力滤波器研究 [J]. 电力电子技术, 2007, 41(9): 7- 9
- [12] 何致远, 瞿 晓. 基于电源滤波的三相 PWM 整流器模糊控制策略研究 [J]. 电工技术学报, 2006, 21(4): 107- 110
- [13] 范瑞祥, 罗 安, 涂春鸣. 并联混合型有源滤波器的分频控制方法研究 [J]. 中国电机工程技术学报. 2007, 27(25): 108 - 113
- [14] Chen Donghua, Xie Shaojun. Review of the control strategies applied to active power filters[C] //2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies (DRPT2004). Hong Kong [s n], 2004.

(责任编辑: 顾泉佩)