

并联型有源滤波器 H_∞ 控制设计

周兴家¹, 沈 沉¹, 梅生伟¹, 刘 锋², 程建洲¹

(1. 清华大学 电机系电力系统国家重点实验室, 北京 100084;

2. 中国科学院 系统所, 北京 100080)

摘要: 在并联型有源滤波器的控制过程中, 前馈控制能够快速跟踪负荷波动, 但需要精确的模型和参数。为了消除前馈控制指令与理想控制指令之间误差对补偿效果的不利影响, 首先建立了并联型有源滤波器的数学模型。在此基础上, 将误差看作是对控制系统的外部干扰, 然后基于 H_∞ 控制理论, 设计了并联型有源滤波器的鲁棒控制器。对于给定的干扰抑制比, 通过求解 Riccati 方程即可得到相应的反馈参数; 在 Riccati 方程有正定解的前提下, 干扰抑制比越小, 闭环系统的干扰抑制能力越强。该控制器补偿效果良好, 同时还可保证闭环系统的稳定性。仿真分析表明, 在所提控制器的作用下, 无论是在稳定负荷还是在负荷突变的条件下, 有源滤波器都有较好的补偿效果。

关键词: 有源滤波器; H_∞ 控制; 稳定性

中图分类号: TN 713⁺.8; TP 214 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2006)08-0045-04

0 引言

随着电力系统中的谐波和无功电流问题日渐突出, 电力电子技术获得了越来越广泛的应用。其中, 电力有源滤波器作为抑制电网谐波、补偿供电系统无功功率的新型电力电子装置, 得到了迅速发展^[1-2]。

作为电力有源滤波器最基本的形式, 并联型有源滤波器通常采取前馈和闭环反馈 2 种控制方式, 前者通过检测负荷电流, 后者通过检测电源电流得到控制参考电流。后者的补偿效果要好于前者, 但存在稳定性问题。目前, 在稳定性分析方面已有较好的成果, 其中文献[3-4]在分析电路的基础上, 为配电网中含有高通输出滤波器的并联型电力有源滤波器建立了数学模型, 然后从频域角度对系统的稳定性进行分析, 利用 Routh 判据得到相应反馈参数的近似稳定域, 最后给出了参数调整的一些原则。本文从时域角度为配电网中含有高通输出滤波器的并联型电力有源滤波器建立了线性状态空间模型, 并在模型中考虑外部干扰。为抑制各种外部干扰对输出的影响, 本文应用线性 H_∞ 理论设计了有源滤波器的 H_∞ 反馈控制器。由于在模型中考虑了干扰对闭环系统的影响, 该控制器在保证有源滤波器无外扰时渐近跟踪参考电流的同时, 还显著提高了整个有源滤波器的鲁棒性。

1 H_∞ 控制简介^[5]

任何一个实际运行的工程系统都会或多或少地受到不确定性的影响。所谓不确定性有 2 类, 一是外部不确定性, 通常指外界对系统的干扰; 二是内部不

确定性, 主要包括未建模动态和量测误差等。

20 世纪 60 年代前后发展起来的以线性最优控制和非线性微分几何为代表的现代控制理论一般基于被控对象的精确数学模型设计控制器, 该类理论虽然能够为控制器设计提供完善的解析设计手段, 但由于在系统建模时忽视了不确定性, 从而使得所设计的控制器难以达到预期的性能指标。弥补这种不足的有效手段就是在系统的设计阶段就考虑被控对象中存在的各种不确定因素, 并以降低这些不确定因素对输出的影响为设计目标。这就是 H_∞ 控制的基本思想, 下面简要介绍线性 H_∞ 控制设计方法。

考察由下述状态方程和输出方程组成的控制系统:

$$\dot{x} = Ax + B_1 w + B_2 u, \quad y = Cx \quad (1)$$

式中 $x(t)$ 是 n 维状态变量; $u(t)$ 是 r 维控制向量; $w(t)$ 是 n 维干扰量; $y(t)$ 是输出; A 、 B_1 、 B_2 、 C 是相应维数的矩阵。

线性 H_∞ 控制问题是指给定 $\gamma > 0$, 对系统(1)设计一个状态反馈控制器 $u = -kx$, 使得闭环系统满足如下性能准则:

- 当 $w=0$ 时闭环系统在 $x=0$ 点渐近稳定;
- 对任意给定的 $T > 0$, 下面的不等式

$$\int_0^T \|y(t)\|^2 dt \leq \gamma^2 \int_0^T \|w(t)\|^2 dt \quad (2)$$

对所有 w 成立, 这里 γ 的大小反映了闭环系统干扰抑制的水平。

线性 H_∞ 控制问题的求解主要步骤如下:

- 求解 Riccati 方程 $A^T P + PA + P(\frac{1}{\gamma^2} B_1 B_1^T - B_2 B_2^T)P + C^T C = 0$ 的非负解, 同时使得 $A + \frac{1}{\gamma^2} B_1 B_1^T P - B_2 B_2^T P$ 为稳定阵;

b. 构造 H_∞ 控制规律

$$u = -B_2^* P^* x(t) \quad (3)$$

2 控制对象建模及 H_∞ 控制器设计

2.1 控制对象建模

本文所研究的并联型有源滤波器与配电网的联结关系如图 1 所示,其中 e_s 是电源电压, L_s 是等效电源电感, R_s 是等效电源电阻。

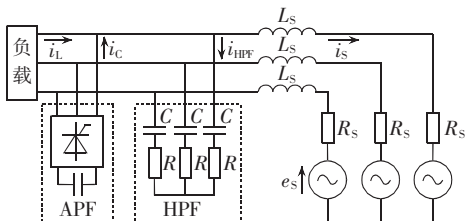


图 1 并联型有源滤波器与配电网的联结关系

Fig.1 Connection of shunt APF and distribution network

并联有源滤波器 APF 用于补偿负载电流 i_L 中的谐波分量,由于有源滤波器会产生开关频率附近的高次谐波电流,通常为了消除这些高次谐波电流,需要在有源滤波器出口位置并联小容量的高通滤波器 HPF,滤波器可以是一阶或二阶高通滤波器,这里考虑一阶滤波器。

假设三相电路对称且三相电源电压无畸变,则单相等效谐波电路如图 2 所示。

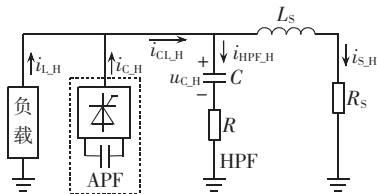


图 2 单相等效谐波电路

Fig.2 The single-phase equivalent harmonic circuit

其中, i_{LH} 为负载谐波电流, i_{CH} 为有源滤波器谐波电流, i_{SH} 为电源谐波电流, i_{HPFH} 为滤波器谐波电流, i_{CLH} 为 i_{LH} 与 i_{CH} 之和,即未经过高通滤波器滤波的电源谐波电流。

图 2 所示系统的动态方程如下:

$$C \frac{du_{CH}}{dt} = i_{HPFH} \quad (4)$$

$$L_s \frac{di_{SH}}{dt} = u_{CH} + R i_{HPFH} - R_s i_{SH} \quad (5)$$

$$i_{HPFH} = i_{CLH} - i_{SH} \quad (6)$$

在并联型有源滤波器装置中,补偿电流发生器的主电路是电压型 PWM 逆变器,其频率特性可以用一个一阶惯性环节 $G_A(s) = 1 / (1 + s\tau_c)$ 近似表示^[4] (其中 τ_c 是惯性时间常数),从而指令谐波电流到 i_{CLH} 的结构图如图 3 所示。

i_{CH}^* 为有源滤波器控制指令电流中的谐波电

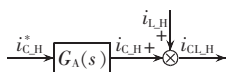


图 3 谐波产生过程

Fig.3 Process of harmonic generation

流,将图 3 中的 i_{LH} 移到 $G_A(s)$ 之前,得:

$$\frac{di_{CLH}}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left(-i_{CLH} + i_{CH}^* + i_{LH} + \tau_c \frac{di_{LH}}{dt} \right) \quad (7)$$

对该系统直接考虑采用前馈控制 $i_{CH}^* = -(i_{LH} + \tau_c di_{LH}/dt)$ 。需要指出的是:尽管前馈控制稳定性好,但补偿效果通常不是很理想,这是因为前馈控制要求精确的模型以及参数,但事实上建模总是近似的,参数也不可能精确得到,且存在噪声;此外,负荷的波动也不可避免。从前馈控制的表达式也可以看出,它需要精确知道 i_{LH} 及其导数,这通常是不现实的。因此,实际的前馈控制指令总是与理想控制指令之间存在误差,这些误差经过有源滤波器和高通滤波器后注入电源。

由于系统本身的频率特性,误差指令产生的某些次谐波分量可能会被放大,从而恶化补偿效果。为改善控制效果,必须对这些误差进行有效抑制。本文考虑采用附加反馈闭环控制保证系统的稳定性,它一定程度上可以减弱模型及参数不精确对于系统性能的影响;进一步采用 H_∞ 的方法设计该闭环控制的反馈增益,以抑制噪声以及负荷变动带来的干扰。为此,本文将前馈指令与理想指令之间的误差看作是对系统的干扰,记为 w 。考虑在前馈控制中引入附加的反馈控制,令 $i_{CH}^* = -(i_{LH} + \tau_c di_{LH}/dt) + u$,同时考虑干扰 w ,可得:

$$\frac{di_{CLH}}{dt} = \frac{1}{\tau_c} (-i_{CLH} + w + u) \quad (8)$$

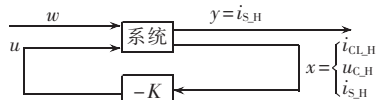
结合式(4)(5)(6)(8),可得系统模型为

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{CLH}}{dt} \\ \frac{du_{CH}}{dt} \\ \frac{di_{SH}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_c} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 & -\frac{1}{C} \\ \frac{R}{L_s} & \frac{1}{L_s} & -\frac{R+R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{CLH} \\ u_{CH} \\ i_{SH} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau_c} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} w + \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau_c} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (9)$$

这里系统的控制量是 u ,控制目标是减弱或者消除 w 对 i_{SH} 的影响,使电源谐波电流 i_{SH} 尽可能小。因此系统的输出选取为

$$y = i_{SH} \quad (10)$$

这样,整个反馈控制器的设计就变为一个标准的线性 H_∞ 控制器的设计问题,如图 4 所示。

图 4 标准的线性 H_∞ 控制设计问题Fig.4 Standard linear H_∞ control design

2.2 H_∞ 控制器设计

令 $\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{CLH} \\ u_{CH} \\ i_{SH} \end{bmatrix}$, 则式(9)(10)所描述的并联型

有源滤波器及其相连配电网的系统模型可写成式(1)形式,其中

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_C} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 & -\frac{1}{C} \\ \frac{R}{L_S} & \frac{1}{L_S} & -\frac{R+R_S}{L_S} \end{bmatrix}, B_1 = B_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau_C} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}^T$$

由系数矩阵可知系统是完全能观完全能控的,且 u 与 w 是匹配的。简单计算表明:在 $\gamma > 1$ 的时候, Riccati 方程总是有解。给定 γ , 然后求解 Riccati 方程,即可得到 H_∞ 反馈控制器

$$u = -k_1 i_{CLH} - k_2 u_{CH} - k_3 i_{SH} \quad (11)$$

综合前馈控制,最终得到有源滤波器控制指令为

$$i_{CH}^* = -i_{LH} - \tau_C \frac{di_{LH}}{dt} - k_1 i_{CLH} - k_2 u_{CH} - k_3 i_{SH} \quad (12)$$

该控制规律由 2 部分组成,前者为带有预测的前馈控制环节 $u_0 = -i_{LH} - \tau_C di_{LH}/dt$, 后者为 H_∞ 反馈控制 $u = -k_1 i_{CLH} - k_2 u_{CH} - k_3 i_{SH}$, 它实际上是在前馈控制的基础上引入的状态反馈。由前述线性 H_∞ 控制问题的描述可知,本文给出的控制规律在保证系统稳定性的同时,对进入闭环系统的干扰信号具有抑制比为 γ 的干扰抑制能力。从控制规律求解过程可知:对于给定的 γ , 通过求解 Riccati 方程即可得到相应的反馈参数 k_1, k_2, k_3 , 因此该设计方法是系统化的。对应不同的 γ 会得到不同的控制规律和不同的补偿效果, γ 的大小反映了闭环系统的干扰抑制水平,在 Riccati 方程有正定解的前提下, γ 越小,闭环系统的干扰抑制能力越强。

3 仿真分析

为了验证本文提出的 H_∞ 控制规律的正确性,运用 PSCAD 3.08 软件进行了器件级仿真。仿真中运用瞬时无功功率理论提取谐波电流^[6-7],考虑控制频率为 6.4 kHz(控制周期 156.25 μs),控制延时 1 个控制周期^[8-9],PWM 脉冲触发方式为空间矢量 PWM^[6,10]。仿真条件:电源线电压 380 V,等效电源电阻为 0.1 Ω ,等效电源电感 2 mH,连接电感 1.5 mH,高通滤波电容 30 μF ,滤波电阻 1 Ω ,负荷为不可控三相整流负荷。

整流器负荷电流以及采取前馈控制补偿后得到的电源电流如图 5(a)所示,图中 i_{La} 是负荷 a 相电流, i_{CLa} 是未经过高通滤波器滤波的电源电流, i_{Sa} 是经过滤波后的电源电流。图 5(b)给出了对应于各电流的傅里叶分析,其中 λ 为各次谐波电流与基波电流的比值, n 为谐波次数。

从图 5 可以看出:前馈控制能够跟踪指令电流,在一定程度上补偿系统的谐波,但是部分频率的谐

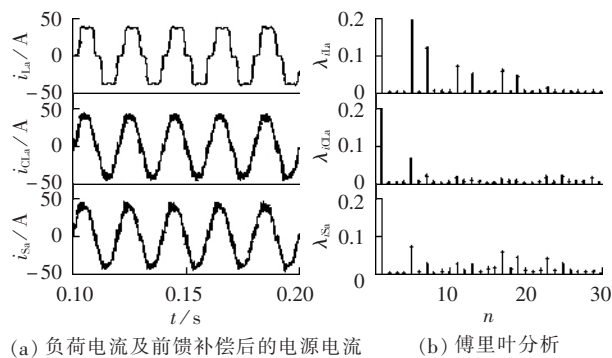


图 5 电流波形及其傅里叶分析

Fig.5 Current waveforms and their Fourier analysis

波被放大了,补偿后的电源电流波形并不是很理想。

对与上面算例完全相同的测试系统,考虑在前馈的基础上附加 H_∞ 反馈控制,控制器参数取 $\gamma = 1.4$,可以解得 $k_1 = 0.51, k_2 = 0.15, k_3 = 0.12$;进一步增强控制的干扰抑制能力,取 $\gamma = 1.2$,可以解得 $k_1 = 1.69, k_2 = 0.64, k_3 = 0.8$ 。对应上述 2 种 γ , H_∞ 控制补偿后的电源电流如图 6 所示,图 7 给出了对应于图 6 的电流傅里叶分析。

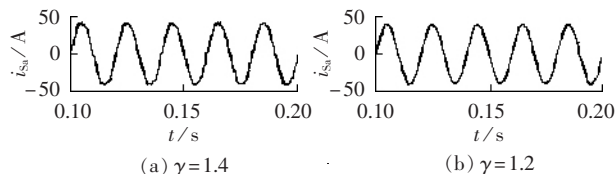


图 6 H_∞ 控制补偿后的电源电流

Fig.6 Source currents after compensation by H_∞ control

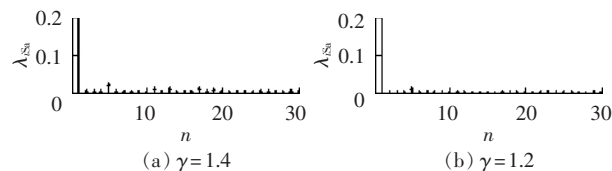


图 7 不同 γ 的电源电流傅里叶分析

Fig.7 Fourier analysis of source currents under different γ

从图 6 和图 7 可见, H_∞ 控制补偿后电源电流的波形与单纯的前馈控制相比,得到了明显的改善。并且随着 γ 的减小,波形进一步得到了改善,谐波基本上被消除。

再考虑三相不平衡负荷中包含谐波,且负荷突变的情况。各相负荷电流和电源电流波形如图 8 所示。

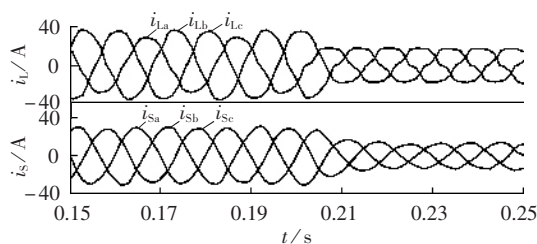


图 8 不平衡谐波负荷及补偿后电源电流

Fig.8 Unbalanced harmonic load and source current after compensation

从仿真结果可见:在所提出的控制器作用下,APF很好地补偿了电源电流的不平衡,同时谐波也基本上被消除;在负荷突然降低后,APF的输出迅速跟踪了这一突变,电源电流依然保持为三相对称正弦。

4 结论

针对配电网中含有高通输出滤波器的并联型电力有源滤波器,本文首先建立了状态空间模型,进一步在前馈控制的基础上,根据 H_∞ 控制设计了干扰抑制控制器。该控制器具有下述优点:

a. 在保证整个系统稳定性的同时,可以消除由于干扰引起的开环控制的性能恶化,并且对于负荷变动等干扰具有可调节的抑制能力;

b. 控制器反馈参数的设定是系统化的,它通过给定干扰抑制 γ ,并求解相应的 Riccati 方程即可得到,而且 γ 大小反映了对干扰抑制程度,在 Riccati 方程有正定解的前提下, γ 越小补偿效果越好;

c. 对于 APF 的谐波补偿、三相不平衡补偿,无论是在稳定负荷还是在负荷突变的条件下,都有较好的补偿效果。

需要指出的是:本文建立的线性模型需要依赖于电源的等效阻抗,且没有考虑模型参数的不确定性,因此在以后的工作特别是工程实用化技术方面还须进行深入的研究。

参考文献:

- [1] AKAGI H. New trends in active filters for power conditioning [J]. IEEE Trans on Industrial Applications, 1996, 32(6): 1312-1322.
 - [2] AKAGI H. Trends in active power line conditioners [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1994, 9(3): 263-268.
 - [3] 颜晓庆,杨君,王兆安. 并联型电力有源滤波器的数学模型和稳定性分析[J]. 电工技术学报, 1998, 13(1): 41-45.
- YAN Xiao-qing, YANG Jun, WANG Zhao-an. The mathematical model and stability analysis of shunt active power filter [J].

- Transaction of China Electrotechnical Society, 1998, 13(1): 41-45.
- [4] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社, 1998.
 - [5] 梅生伟,申铁龙,刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
 - [6] HUANG Shyh-jier, WU Jinn-chang. A control algorithm for three phase three-wired active power filters under nonlinear mains voltages [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1999, 14(4): 753-760.
 - [7] CHANG G W, CHEN S K. An a-b-c reference frame-based control strategy for the three-phase four-wire shunt active power filter [C] // The Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power. [S. l.]: IEEE, 2000: 26-29.
 - [8] le ROUX W, van WYK J D. The effect of signal measurement and processing delay on the compensation of harmonics by PWM converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(2): 297-304.
 - [9] BAE Bon-ho, SUL Seung-ki. A compensation method for time delay of full-digital synchronous frame current regulator of PWM AC drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(3): 802-810.
 - [10] EL-HABROUK M, DARWISH M K, MEHTA P. Active power filters: a review [J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 2000, 147(5): 403-413.

(责任编辑:李育燕)



作者简介:

周兴家(1977-),男,辽宁大连人,硕士研究生,研究方向为电能质量(E-mail:zhouxj03@mails.tsinghua.edu.cn);

沈 沉(1970-),男,四川成都人,副教授,博士,研究方向为电力系统分析、电力网络以及电力电子技术的应用;

梅生伟(1964-),男,河南新野人,教授,博士,研究方向为电力系统分析与控制;

刘 锋(1977-),男,重庆人,博士,研究方向为非线性控制系统及其在电力系统中的应用;

程建洲(1981-),男,河南驻马店人,硕士研究生,研究方向为电能质量。

Design of H_∞ control for shunt active power filter

ZHOU Xing-jia¹, SHEN Chen¹, MEI Sheng-wei¹, LIU Feng², CHENG Jian-zhou¹

(1. State Key Lab of Power Systems, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: For the control of shunt APF (Active Power Filter), feedforward is an effective way to track the load variation, but accurate models and parameters are demanded. To eliminate the influence of errors between realistic and ideal control instructions on the compensation effectiveness of APF, a state-space model of distribution system with APF containing a HPF (High-Pass Filter) is established. Taking errors as unknown disturbances to the system, a supplementary feedback controller based on the H_∞ control theory is designed. With a given interference suppression ratio, corresponding feedback parameters can be obtained by solving the Riccati equation. When positive definite solution exists, the smaller the interference suppression ratio is, the stronger interference suppression capability the close-loop system will have. The controller ensures the stability of the close-loop system with effective compensation. Simulation results prove that, the APF with the designed controller performs well for both stable load and sudden-changing load.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China (50377108).

Key words: active power filter; H_∞ control; stability