

并联型有源滤波器的 H_∞ 控制

赵莹, 曲铁龙

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 电力系统的运行工况复杂, 要得到系统和干扰的精确数学模型几乎是不可能的。介绍了 H_∞ 鲁棒控制器理论的基本原理, 并运用混合灵敏度的方法设计了 APF 的 H_∞ 鲁棒控制器, 能将电力系统的建模误差、参数不确定性和干扰不确定性等因素计入设计方案之中, 因而能使控制系统具有很好的鲁棒性。采用混合灵敏度的方法设计 H_∞ 鲁棒控制器, 在进行合理的降阶后利用 Matlab 软件进行仿真, 结果表明: APF 的 H_∞ 控制具有较好的动态品质, 并使系统具有较强的鲁棒性。自动控制系统最重要的特性莫过于它的稳定性, 在稳定的基础上, 再追求系统满足一定的性能要求, 这样的控制系统才具有实际应用价值。因此, 保证闭环控制系统的稳定性, 这是控制器设计所必须满足的基本要求。利用 Matlab 软件进行仿真, 结果表明: APF 的 H_∞ 控制具有较好的稳定品质。

关键词: 有源滤波器; H_∞ 控制; 混合灵敏度; 鲁棒性; 稳定性

Research on parallel active filter with H_∞ control

ZHAO Ying, QU Yi-long

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The power system has a complex operation condition, so it is almost impossible to gain the exact mathematics model of the system and interference. This paper presents the ultimatum of H_∞ robust controller and applies it to the design of active power filter (APF), to reckon the modeling error, parameter and disturbance uncertainty in the precepted design, thus can fabricate the control system with good robust characteristic. In allusion to the directed designed controller always have relatively high rank and lead difficult to carry out in the project, this paper applies balanced model to reduce order and exactly actualize with each single harmonic. This paper designs the H_∞ robust controller for APF depending on the mixed sensitivity and reduces the order to simulation on MATLAB. The result indicates that H_∞ robust controller has superior dynamic quality and can enable the system with relatively stronger robust character. The most important character of the automatic control system is stability and it is also the basic requirement for the designed controller. Simulation on MATLAB and the results indicate that H_∞ robust controller has superior stability.

This project is supported by National Natural Science Foundation of Beijing(No.306201).

Key words: APF; H_∞ control; mixed sensitivity; robust; stability

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)10-0024-07

0 引言

在现代工业企业和家用电器中, 非线性电力负荷在大量增加, 对供电质量造成严重的污染。另一方面, 现代工业、商业及居民用户对供电质量提出了更高的要求。有源电力滤波器(APF)^[1]具有高度可控和快速响应的特性, 它不仅能补偿各次谐波, 还可抑制闪变、补偿无功, 有一机多能的特点。其滤波特性不受系统阻抗的影响, 同时还具有自适应功能, 可自动跟踪补偿变化的谐波。近年来, 有源电力滤波器作为提高电力系统稳定性、改善供电质量的一项关键技

术得到广泛的重视并取得了很大发展^[1]。

同时, 电力系统的运行工况复杂, 要得到系统和干扰的精确数学模型几乎是不可能的。采用 H_∞ 鲁棒控制理论设计单相 APF 的控制方法, 能将电力系统的建模误差、参数不确定性和干扰不确定性等因素计入设计方案之中, 因而能使控制系统具有很好的鲁棒性。但是直接设计出的控制器阶数往往较高, 工程中难以实现, 因此本文采用针对各次谐波分别应用平衡模型降阶的方法, 有效解决了降阶的问题。

1 H_∞ 控制原理^[2]

1.1 标准 H_∞ 控制问题

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(306201)

各种H_∞控制问题都可以化成如图1所示的标准问题。图中w, z, u, y均为向量值信号; w是1维外部输入信号, 一般包括指令(参考)信号、干扰和传感器噪声。z是p维受控输出, 通常包括跟踪误差、调节误差、执行机构输出。u是n维控制信号, 同时也是控制器输入。y是m维量测输出, 可能是传感器输出及指令信号等。图中G, K分别为广义受控对象和控制器。前者是系统的给定部分, 而控制器K有待设计。假定G和K为线性时不变系统的频率域描述, 并假定传递函数矩阵G(s)和K(s)是真实有理函数矩阵。

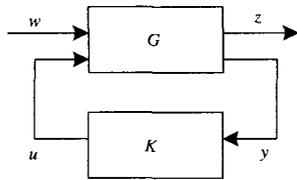


图1 H_∞标准控制问题
Fig.1 Standard H_∞ control

其中

$$\begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \quad (1)$$

标准H_∞控制问题就是求正则控制器:

$$u = K(s)y \quad (2)$$

使得闭环系统稳定, 并使w到z的传递函数:

$$\phi = G_{11} + G_{12}K(I - G_{22}K)^{-1}G_{21} \quad (3)$$

的H_∞范数最小, 即求解 $\min \|\phi\|_{\infty}$ (4)

1.2 H_∞控制的混合灵敏度问题

混合灵敏度问题是H_∞控制的最典型的问题之一, 控制问题中的许多不同要求的H_∞优化问题都可以归结为混合灵敏度问题。在实际中通常是干扰和被控对象的不确定性同时存在, 因此求解混合灵敏度问题非常有意义。其结构如图2所示。

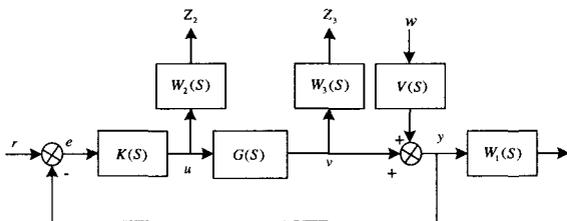


图2 混合灵敏度问题
Fig.2 Mixed sensitivity

其中: $W_1(S), W_2(S), W_3(S), V(S), W_2(S)$ 为加权函

数, V 为加权后的干扰输入, 其它符号同图1。

2 单相 APF 系统模型

本文研究的 APF 系统拓扑结构^[4]如图3所示, 它由一个电网构成。电压源型逆变器(VSI)连接一个直流电容 C_f 和一个未知非线性负荷。假设电源电压为纯正弦($f_1 = 50$ Hz), 负载电流 i_c , 可分为谐波 i_{ch} 和基波 i_{cf} 两部分:

$$i_c(t) = i_{ch}(t) + i_{cf}(t) \quad (5)$$

图中负荷为具有二极管桥臂的整流器, 它带有阻感负载。

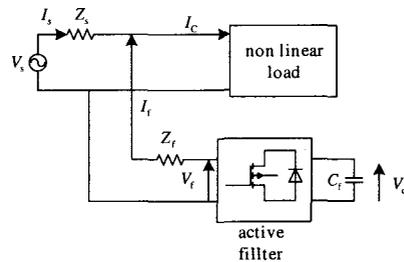


图3 APF系统拓扑结构
Fig.3 APF topology configuration

系统的等效电路图如图4示, 它可以由下列传递函数得到:

$$i_c(s) = \underbrace{\frac{N_1(s)}{D(s)}}_{\sigma(s)} v_f(s) + \underbrace{\frac{N_2(s)}{D(s)} i_c(s) - \frac{N_1(s)}{D(s)} v(s)}_{d(s)} \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} N_1(S) = -1, N_2(S) = R_f + sL_f \\ D(S) = (R_s + R_f) + s(L_s + L_f) \end{cases} \quad (7)$$

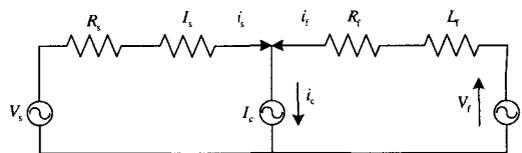


图4 系统的等效电路图
Fig.4 Systemic equivalent circuit diagram

V_s 和 i_s 为电源电压和电流, i_c 为负载电流, i_f 为补偿电流, V_f 为 APF 的控制输入。

从式(6)可以看出, 电源电流 I_s 由 V_f 控制, 控制器的设计必须同时满足可行性和鲁棒性。我们的实现目标是对各次谐波干扰确定一个给定的衰减

度，而保持基波成分不变。数学上表述如下：

$$\begin{cases} |I_s(2j\pi f_1)| = |I_c(2j\pi f_1)| \\ |I_s(2j\pi f_n)| \ll |I_c(2j\pi f_n)| \end{cases} \quad n = 3, 5, 7, 9 \quad (8)$$

其中： $f_1 = 50 \text{ Hz}$ ， $f_n = n \cdot f_1$ 分别为基波和 n 次谐波的频率。在加权函数构成的 H_∞ 标准结构中，可以看出上述性能。

3 应用 H_∞ 控制理论进行单相 APF 控制器设计

3.1 系统转化为标准 H_∞ 控制问题^[5]

对照图 1，得出此系统闭环控制模型如图 5 所示。

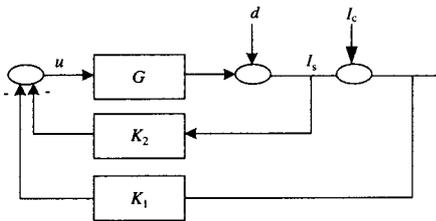


图 5 闭环系统模型

Fig.5 Closed loop model

闭环传递函数为：

$$\begin{pmatrix} I_s - I_c \\ I_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{1+G(K_1+K_2)} & \frac{1+GK_1}{1+G(K_1+K_2)} \\ \frac{1}{1+G(K_1+K_2)} & \frac{GK_2}{1+G(K_1+K_2)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ I_c \end{pmatrix} \quad (9)$$

我们定义：

$$S = \frac{1}{1+G(K_1+K_2)} = \frac{I_s}{d} \quad (10)$$

$$T_1 = \frac{1+GK_1}{1+G(K_1+K_2)} = \frac{I_s - I_c}{I_c}$$

运行指标为：

$$\begin{cases} |S(2j\pi f_n)| \ll 1 \\ |T_1(2j\pi f_1)| \ll 1 \end{cases} \quad n = 3, 5, 7, 9 \quad (11)$$

计算控制器 $K(s)$ 使满足：

$$J(K) = \left\| \begin{matrix} W_1 S & W_1 T_1 \\ W_2 S & W_2 (1 - T_1) \end{matrix} \right\|_\infty = 1 \quad (12)$$

式(12)由稳定性限制。

W_1 与 W_2 式加权函数，它们满足：

$$|W_1(2j\pi f_1)| \gg 1 \quad (13.1)$$

$$\bar{\sigma}(W_2(2j\pi f_n)) \gg 10 \quad (13.2)$$

图 6 为加权函数下的标准 H_∞ 控制图：

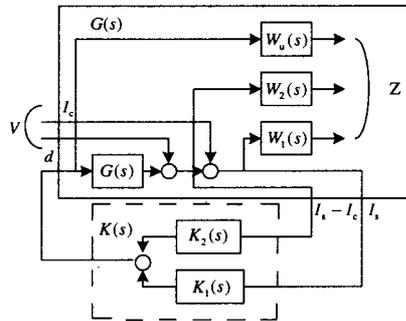


图 6 标准的 H_∞ 控制问题

Fig.6 Standard H_∞ control

实际上，由 $J(K) = 1$ 我们可以推导出

$$\|W_1 S\|_\infty \leq 1 \quad (14.1)$$

$$\|W_1 T_1\|_\infty \leq 1 \quad (14.2)$$

$$\|W_2 S\|_\infty \leq 1 \quad (14.3)$$

$$\|W_2 (1 - T_1)\|_\infty \leq 1 \quad (14.4)$$

3.2 加权函数的选取

首先考虑 $W_1(s)$ ，它是灵敏度 T_1 的加权函数， T_1 为补偿电流 I_f 对于干扰 I_c 的灵敏度，即不论 I_c 值为多少， I_f 中的基波含量都非常小，从关于基波的二阶陷波器中选取 $W_1(s)$ ，因为陷波器的频率响应效果好，取此陷波器传递函数的倒数为 $W_1(s)$ ，从而

$$W_1(S) = \frac{0.1S^2 + 1.599 \times 10^{-2} S + 9.87 \times 10^3}{S^2 + 1.315 \times 10^{-5} S + 9.87 \times 10^4} \quad (15)$$

由于 W_2 是针对谐波的全函数，因此选取较为复杂，为了避免控制器的阶数过高，本文采用对各次谐波分别选取加权函数，并分别求取控制器的方法。本文设计的 H_∞ 控制器需保证滤掉 3, 5, 7, 9 次谐波，基于式 (14) 的约束条件并通过仿真研究，从关于 3, 5, 7, 9 次谐波的二阶陷波器中选取最终选取加权函数 $W_2(s)$ 为：

$$W_{23}(S) = \frac{0.1S^2 + 1.414S + 8.883 \times 10^4}{0.9993S^2 + 0.01045S + 8.883 \times 10^5} \quad (16.1)$$

$$W_{25}(S) = \frac{0.1S^2 + 5.329S + 2.467 \times 10^5}{0.9973S^2 + 0.109S + 2.467 \times 10^6} \quad (16.2)$$

$$W_{27}(S) = \frac{0.1S^2 + 11.19S + 4.836 \times 10^5}{0.9944S^2 + 0.4463S + 4.836 \times 10^6} \quad (16.3)$$

$$W_{23}(S) = \frac{0.1S^2 + 408.5S + 8.106 \times 10^5}{0.8323S^2 + 17.52S + 8.106 \times 10^6} \quad (16.4)$$

$$W_u = 1e - 5 \quad (17)$$

基于上述权函数和被控对象传递函数 $G(S)$, 利用 Matlab/Robust Control Toolbox 工具箱构成增广被控对象, 然后解 H_{∞} 设计问题, 最终得到具有稳定极限点和零点的 H_{∞} 控制器 $K(S)$ 。全函数 $W_1(s)$, $W_2(s)$ 和 $W_u(s)$, 以及控制器 $K(s)$ 的波特图分别如图 7 所示。

$$K_1(S) = \frac{-1.62 \times 10^6 S^2 - 3.385 \times 10^6 S + 5.847 \times 10^7}{S^3 + 7.238 \times 10^5 S^2 + 1.089 \times 10^5 S + 7.201 \times 10^{10}} \quad (18)$$

$$K_{23}(S) = \frac{-1.421 \times 10^5 S^2 + 5.419 \times 10^6 S + 4.596 \times 10^7}{S^3 + 7.184 \times 10^5 S^2 + 8.964 \times 10^5 S + 6.386 \times 10^{11}} \quad (19.1)$$

$$K_{25}(S) = \frac{-5.359 \times 10^5 S^2 + 6.532 \times 10^7 S + 4.939 \times 10^8}{S^3 + 7.199 \times 10^5 S^2 + 2.552 \times 10^6 S + 1.781 \times 10^{12}} \quad (19.2)$$

$$K_{27}(S) = \frac{-1.126 \times 10^6 S^2 + 2.748 \times 10^8 S + 2.02 \times 10^9}{S^3 + 7.221 \times 10^5 S^2 + 5.187 \times 10^6 S + 3.512 \times 10^{12}} \quad (19.3)$$

$$K_{29}(S) = \frac{-4.916 \times 10^7 S^2 + 1.997 \times 10^{10} S + 1.451 \times 10^{11}}{S^3 + 8.686 \times 10^5 S^2 + 2.802 \times 10^7 S + 8.459 \times 10^{12}} \quad (19.4)$$

各加权函数和控制器的波特图如图 7 示, 从上到下依次为 W_1 , W_2 , K_1 & K_2 的波特图:

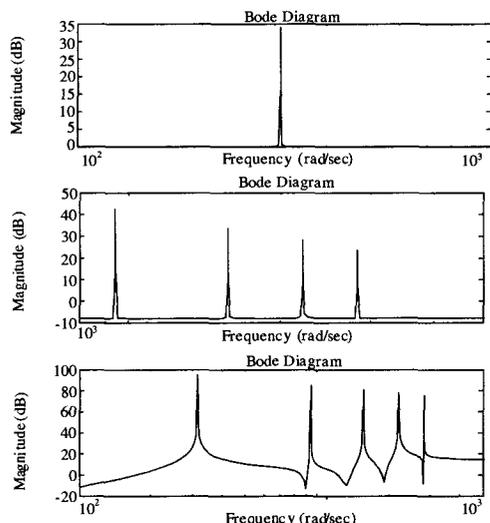


图 7 加权函数和控制器的波特图

Fig.7 Baud picture of addition functions and controller

3.3 控制器降阶的实现^[13]

3.3.1 控制器降阶的原理

在控制系统的设计中, 通常宁愿选用简单的线性控制器而小用复杂的控制器, 理由很明显: 简单的线性控制器易于理解、所需要的计算量少从而便于

实现: 所需的硬件、软件环节简捷从而可靠性高。无论何时, 只要最终性能损失能保持在允许的范围内, 就应当寻找低阶的控制器。本文采用均衡实现模型的降阶算法。

均衡实现是状态方程的非常实用的一种表示形式, 该模型可以将各个状态变量在整个控制系统中的重要程度明确地表示出来。Matlab 的控制系统工具箱提供了 `balreal()`, 可以由已知模型转换出均衡实现模型。该函数的调用格式为:

$$[G_b, g, T] = \text{balreal}(G) \quad (20)$$

其中: G_b 为原系统均衡实现的状态方程模型, 而 g 向量为从大到小排列的 Gram 矩阵元素。若原系统 G 由状态方程给出, 则 T 矩阵为线性相似变换矩阵。

通过矩阵分块方法, 可以重新写出原系统得均衡实现表示:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{cases} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} u \quad (21)$$

$$y = [C_1 \quad C_2] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + D u$$

并假设子状态变量 x_2 需要消去, 这样可以得

出如下的状态方程模型:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = (A_{11} - A_{12}A_{22}^{-1}A_{21})x_1 + (B_1 - A_{12}A_{22}^{-1}B_2)u \\ y = (C_1 - C_2A_{22}^{-1}A_{21})x_1 + (D - C_2A_{22}^{-1}B_2)u \end{cases} \quad (22)$$

控制工具箱中给出了 `modred()` 函数来求取降阶模型, 该函数的调用格式为:

$$G_r = \text{modred}(G, e \text{lim}) \quad (23)$$

其中: G 为均衡实现的原始模型, $e \text{lim}$ 为需要销去的状态变量, G_r 为降阶模型。

3.3.2 平衡模型降阶法的具体应用

本小节以并联 APF 的谐波电流跟踪补偿 APF 控制模块为例说明平衡模型降阶法的具体应用。首先采用平衡模型降阶法利用 Matlab 软件对三次电流谐波的 H_{∞} 最优控制器 K_{23} 实现降阶, 得到三次谐波的降阶控制器 K_{23r} , 表 1 给出了三次谐波的 H_{∞} 最优控制器降阶前后的状态变量值和特征值。可以看出, 通过降阶删掉了一个对全局没有太大影响的状态 0.098905 和一个远离虚轴的特征值 $-7.08399989587743e005$, 特征值由三个变为两

个,使得控制器的阶数降低了一阶,降阶后的控制器 $K_{23r}(s)$ 为:

$$K_{23r}(s) = \frac{-0.1978s^2 + 7.298s + 63.98}{s^2 + 0.01041s + 8.889 \cdot 10^5} \quad (24)$$

表1 三次谐波的 H_∞ 控制器降阶前后的状态变量值及特征值

Tab.1 State variables and eigenvalues of the third harmonic before and after the reduced order controller

未降阶的 $K_{23}(s)$ 的状态变量	降阶的 $K_{23r}(s)$ 的状态变量值
8966	8966
8965.9	8965.9
0.098905	

未降阶的 $K_{23}(s)$ 的特征值	降阶的 $K_{23r}(s)$ 的特征值
1.0e+005 *	1.0e+002 *
-7.18399989587743	-0.00005206128178+
-0.00000005206128+	9.42825452924808i
0.00942825452925i	-0.00005206128178-
-0.00000005206128-	9.42825452924808i
0.00942825452925i	

同理也可采用平衡模型降阶法利用 Matlab 软件对五次、七次、九次谐波的 H_∞ 最优控制器进行降阶,然后再将上述的控制器进行合成即可得到降阶后的 APF 用于谐波电流跟踪补偿实现 APF 功能的控制器 $K_r(s)$ 。图 8 的 Bode 图为 APF 闭环控制系统降阶前后的幅频特性曲线(上图)和相频特性曲线(下图),实线为降阶前的,虚线为降阶后的,可见在所关心的频段内降阶前后的特性曲线重合在一起了,因此降阶后的 $K_r(s)$ 控制器能够保证 APF 闭环控制系统的性能,在实际应用中应采用降阶后的控制器参数。

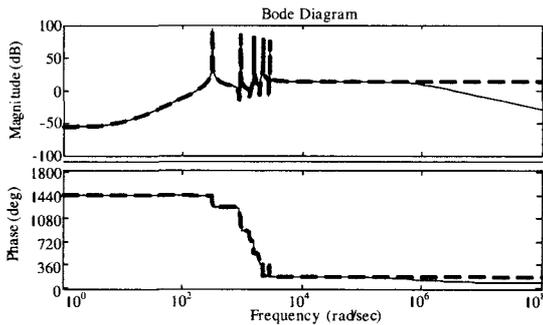


图 8 降阶前后控制器的波特图

Fig.8 Controller baud chart before and after rank reducing

4 数字仿真模型的建立

为了验证设计出的 H_∞ 鲁棒控制器的稳态、动态特性和鲁棒性能,本文利用 Matlab7.0 仿真软件,对上述理论研究做了数字仿真试验^[6]。

4.1 仿真模型的建立^[7]

图 9 为加入加权函数后的 H_∞ 控制系统基于 Matlab/Simulink^[7]的仿真框图。上图的 subsystem 即为控制系统中的传递函数,下图为传递函数的具体模型实现。其中控制器选用为降阶后的数值,部分仿真参数如下:

电源电压: $V_{smax} = 311 \text{ V}, f = 50 \text{ Hz}$;

负载电流: 为单相全桥整流器;

APF 模型参数:

$L_s = 0.46 \text{ mH}, R_s = 0 \Omega, L_f = 9.6 \text{ mH}, R_f = 0.123 \Omega$

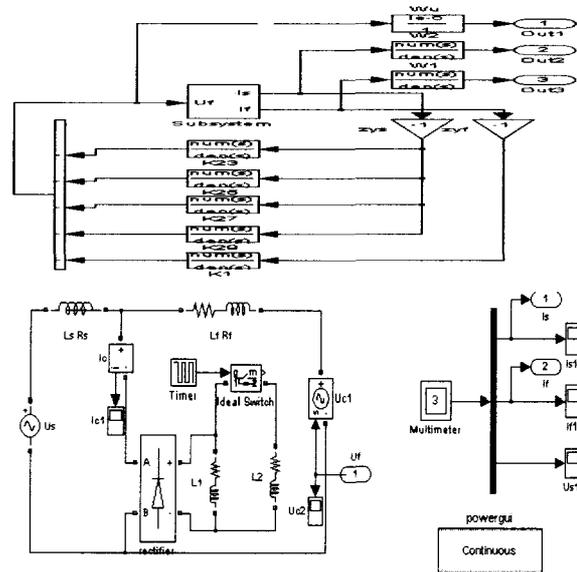


图 9 基于 Matlab/Simulink 的仿真框图

Fig.9 Simulation based on Matlab/Simulink

4.2 仿真结果和分析

稳态仿真结果如图 10 示。其中(a)为系统稳态运行时的波形,波形从上到下依次为负载电流 i_c 、电源电流 i_s 和 APF 输出的补偿电流 i_f ,可以看出电源电流被补偿为接近正弦波;(b)从左到右依次为 i_c, i_s 和 i_f 的频谱分析图,从图中可以看出,基于 H_∞ 控制的有源滤波器能够有效的滤除负载电流中的 3, 5, 7, 9 次谐波,电源电流 THD 从 26.52%降到 1.13%,从而证明了 H_∞ 鲁棒控制器的有效性和稳定性。

动态运行时仿真结果如图 11 所示,负载跳变时的动态波形,在 $t=4\text{ s}$ 与 $t=8\text{ s}$ 时刻,负载电流从 17.92 A 跳变到 24.04 A,在 $t=6\text{ s}$ 与 $t=10\text{ s}$ 时刻,负载电流从 24.04 A 跳变到 17.92 A,经过一个周波周期,APF 输出需要的补偿电流,使得电源电流变为稳定的正弦波。从图中可以看出,当干扰即负载电流变化时,控制系统能及时跟踪补偿,实现了系统的鲁棒性。

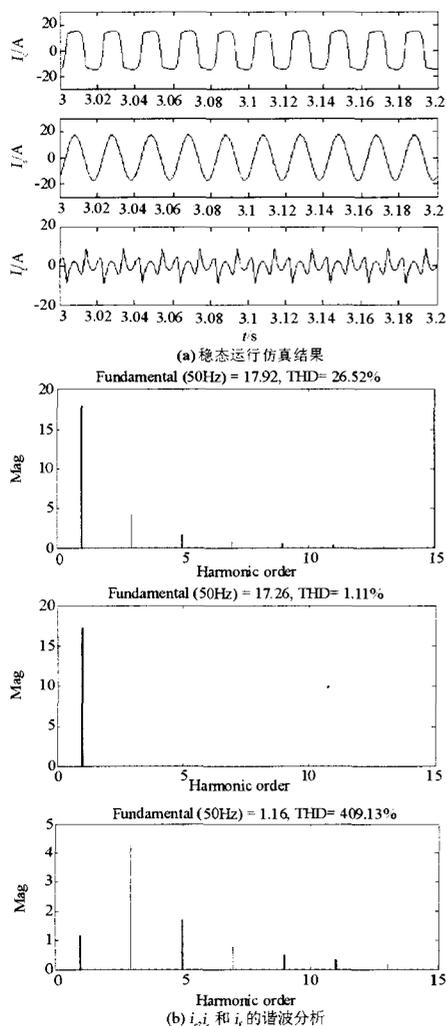


图 10 稳态运行仿真结果及谐波分析
Fig.10 Steady operation simulation result and harmonic analysis

5 APF 补偿单元闭环控制系统的稳定性^[10]

自动控制系统最重要的特性莫过于它的稳定性,在稳定的基础上,再追求系统满足一定的性能要求,这样的控制系统才具有实际应用价值。因此,保证闭环控制系统的稳定性,这是控制器设计所必

须满足的基本要求。输出稳定可以保证系统对于有界输入所引起的输出是有界的,但不能保证某些内部信号是有界的,这种情况对某些控制系统是不允许的,可能引起该实际装置内部结构的损坏,甚至发生事故,因此需要保证系统是内部稳定的。为此需要根据系统的特征值来判断系统是否为内部稳定的。利用 Matlab 软件可很方便地求出闭环系统的特征值,表 2 给出了 APF 并联补偿单元闭环控制系统的特征值。可见所有的特征值均具有负实部,因此,得到的该闭环控制系统是内部稳定的,可确保 APF 的电流波形跟踪补偿控制系统稳定可靠地工作,能够自动消除扰动而不会放大扰动。

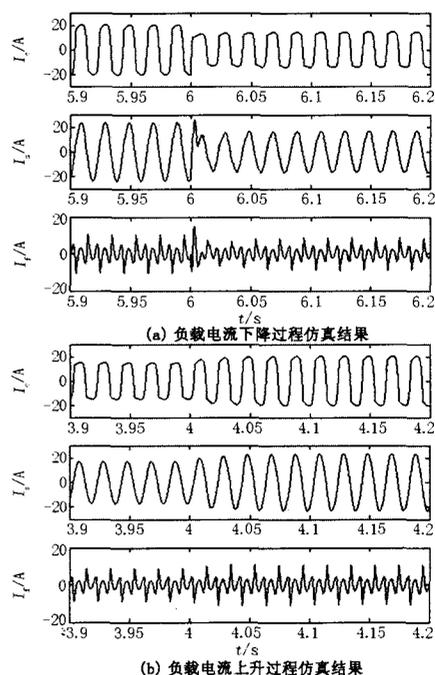


图 11 动态运行仿真结果

Fig.11 Dynamic operation simulation result

表 2 APF 并联补偿单元闭环控制系统的特征植

Tab.2 Eigenvalues of the APF Parallel Compensation closed-loop control system

Ans=
1.0e+005*
-0.00003502355768+0.02826930008094i
-0.00003502355768-0.02826930008094i
-0.00055485455248+0.02195531795227i
-0.00055485455248-0.02195531795227i
-0.00027126723197+0.01572159339382i
-0.00027126723197-0.01572159339382i
-0.00007154370399+0.00942890935331i
-0.00007154370399-0.00942890935331i
-0.00007142863646

6 结束语

电力系统的运行工况复杂,要得到系统和干扰的精确数学模型几乎是不可能的,这使传统 APF 难以取得理想的控制效果。基于 H_{∞} 控制理论的 APF 将这些不确定因素计入设计方案,仿真结果表明,模型具有很好的鲁棒性,可以改善电力系统的动态特性,提高系统的动态稳定。利用 Matlab 程序包,可方便地实现基于 H_{∞} 控制理论的 APF 控制器的设计。

参考文献

- [1] 周林,庄华,栗秋华,等. 单相有源电力滤波器的控制方法[J]. 重庆大学学报, 2007,(1):36-39.
ZHOU Lin, ZHUANG Hua, LI Qiu-hua, et al. Control Method for Active Power Filters for Single-phase[J]. Journal Chongqing University, 2007,(1):36-39.
- [2] 申铁龙. H_{∞} 控制理论及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,1996.
SHEN Tie-long. H_{∞} Control Theory and Application[M]. Beijing: Qinghua University Press,1996
- [3] 雷绍兰,颜伟,王官洁,等. 统一潮流控制器的 H_{∞} 鲁棒控制器设计[J]. 中国电力, 2002,(6):52-54.
LEI Shao-lan, YAN Wei, WANG Guan-jie, et al. Design for Unified Power Flow H_{∞} Controller[J]. Electric Power,2002,(6):52-54.
- [4] A Comparative Study of Shunt Hybrid and Shunt Active Power Filters for Single-phase Applications: Simulation and Experimental Validation[Z].
- [5] 蔡超豪,李川,刘宁. 应用 H_{∞} 控制理论进行电力系统稳定器的设计[J]. 东北电力技术,2000, (7):2-5, 12.
CAI Chao-hao, LI Chuan, LIU Ning. Design for Power System Stabilizer Based on H_{∞} Control Theory[J]. Northeast Electric Technology, 2000, (7):2-5, 12.
- [6] 蔡超豪,郑俊哲. H_{∞} 控制理论和 MATLAB 工具箱应用于电力系统稳定器设计[J]. 沈阳工程学院学报, 2005, (1):47-50.
CAI Chao-hao, ZHENG Jiu-zhe. H_{∞} Control Theory and Matlab Toolbox for Power System Stabilizer[J]. Shenyang College for Journal of Engineering, 2005, (1):47-50.
- [7] Mathematics and Computers in Simulation, 2006.
- [8] 周兴家,沈沉,梅生伟,等. 并联型有源滤波器 H_{∞} 控制设计[J]. 电力自动化设备,2006, (8):49-52.
ZHOU Xing-jia, SHEN Chen, MEI Sheng-wei, et al. Design Shunt Active Power Filters for Single-phase Based on H_{∞} Control Theory[J]. Electric Power Equipment Automation, 2006, (8):49-52.
- [9] Design and Application Research on Arc-suppression Coil with Thyristor Series Capacitors[J]. Automation of Electric Power Systems.
- [10] Study on the Arc-suppression Coil in 10kV System of Loyang Thermal Power Plant[J]. Power System Technology,1999.
- [7] Finin T, Fritzson R, McKay D, et al. KQML as an Agent Communication Language[A]. In: Proceedings of the Third International Conference on Information and Knowledge Management (CIKM'94)[C].1994.
- [8] Power Technologies Inc(PTI) . PSS/ E - 27 Program Application Guide Online Documentation[Z] . 2000.
- [9] External Interfaces Working Group ARPA Knowledge Sharing Initiative, Specification of the KQML Agent Communication Language[Z]. 1992.
- [10] Akira, Andoh Simon Nash. RMI Over IOP[Z]. JavaWorld.com, 1999.
- [11] Ejebe G C, Wollenberg B F. Automatic Contingency Selection[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1979,98(1): 97-104.
- [12] 王锡凡,方万良,杜正春.现代电力系统分析[M].北京:科学出版社, 2003.
- [13] Song H, Kezunovic M. Static Analysis of Vulnerability and Security Margin of the Power System[A]. In: Proc IEEE PES Transmission & Distribution Conference & Exposition[C]. Texas:2006.147-152.

收稿日期: 2008-04-08

作者简介:

赵莹(1984-),女,研究生,研究方向为电力系统运行分析与控制。E-mail: zyl@ncepu.edu.cn

收稿日期: 2007-09-20; 修回日期: 2007-10-23

作者简介:

刘意川(1982-),男,硕士研究生,主要研究方向为继电保护以及人工智能; E-mail:yichuanl@sjtu.edu.cn

张沛超(1970-),男,博士,副教授,主要研究方向为继电保护、电网调度自动化以及人工智能。

(上接第 23 页 continued from page 23)