

文章编号: 1001-0920(2004)01-0077-04

并联型有源电力滤波器的无源性控制

钟 庆, 吴 捷, 杨金明

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘 要: 将无源性控制应用于并联型有源电力滤波器, 对有源电力滤波器电路进行简化等效, 把负载电压和电源电流作为状态变量, 把补偿电流作为控制变量, 通过坐标变换建立有源电力滤波器的数学模型, 通过无源性理论获得简单而容易实现的控制律. 仿真结果表明系统具有良好的稳定性和鲁棒性.

关键词: 谐波; 有源电力滤波器; 无源性控制

中图分类号: TP29

文献标识码: A

Passivity-based control of the shunt active power filters

ZHONG Qing, WU Jie, YANG Jinming

(Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China Correspondent: ZHONG Qing, E-mail: zhongqing1978@263.net)

Abstract The passivity-based control is applied into the shunt active power filters (SA PF). After simplifying the circuit of the APF, the model is established. The load voltage and the supply current are considered as the state variables of the system, and the compensating current is taken as the control variable. Then a control law is designed by the passivity approach. The simulation results indicate the stability and robustness of the control.

Key words: harmonics; active power filter; passivity-based control

1 引 言

随着电力电子技术的发展, 非线性负载得到广泛的应用, 但这些装置将导致供电系统中谐波分量的增加. 对于三相系统而言, 还会导致三相不平衡和额外的中性线电流. 传统的无源 L-C 滤波器虽可达到一定的滤波效果, 但存在补偿特性固定、体积大和易谐振等缺点^[1]. 与传统的无源滤波器相比, 有源电力滤波器 (APF) 能提供更好的控制和滤波性能^[2]. APF 是一种可控的电流源, 能补偿负载中的谐波电流和无功电流. 当有源滤波器应用于更广泛的负载时, 负载和线路上的参数不确定或未建模动态都有可能使系统失稳, 这将严重制约有源滤波器的广泛使用^[3, 4].

能量是科学和工程实际中的一个基本概念, 通常可将一个动态系统作为一个能量转换装置, 将一个复杂的系统分解为几个简单的子系统, 通过解耦, 用各个子系统能量的总和来决定整个系统的行为. 无源性理论是一种能量“整形”的方法, 通过重新分配系统的能量和注入非线性阻尼, 使系统在满足无源性的条件下达到要求的性能. 这种方法从系统能量角度出发, 使控制器的设计得到一定的简化, 并且提高了系统的鲁棒性^[5].

本文将无源性理论应用于有源电力滤波器, 利用有源滤波器系统本身的物理结构特点, 为构造 Lyapunov 函数提供信息, 通过无源性理论获得较为简单易实现的控制律. 仿真结果表明, 该算法具有较

收稿日期: 2002-07-10; 修回日期: 2003-05-13

基金项目: 国家重点基础研究专项基金项目 (1998020308); 广东省“十五”科技重大专项基金项目 (A 1050202).

作者简介: 钟庆 (1978—), 男, 江西龙南人, 博士, 从事控制理论及其在电力电子中应用的研究; 吴捷 (1937—), 男, 河北乐亭人, 教授, 博士生导师, 从事电力电子技术、新能源技术等研究.

强的稳定性和鲁棒性

2 无源性理论

考察一个非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u, \\ y = h(x). \end{cases} \quad (1)$$

其中 u 和 y 分别是系统的输入和输出信号. 对于系统(1), 有如下定义:

定义1 称系统(1) 对于给定的输入是耗散的, 是指存在一个正定函数 $V(x)$, 使耗散不等式

$$\dot{V} \leq s(u, y), \quad \forall t \geq 0, \quad (2)$$

对于任意输入信号 u 成立. 称 $s(u, y)$ 为供给率, $V(x)$ 为存储函数

可以这样认为: 耗散系统在任意 t 时刻所具有的能量, 总是小于等于初始时刻的能量 $V(x(0))$ 与外部提供的能量 $\int s(u, y)$ 之和, 即

$$V(x(t)) \leq V(x(0)) + \int s(u, y). \quad (3)$$

令

$$s(u, y) = u^T y, \quad (4)$$

可得到如下无源性和严格无源性的定义:

定义2 对于系统(1), 假设 $f(0) = 0, h(0) = 0$, 如果存在一个正定函数 $V(x)$, 使无源性不等式

$$\dot{V} \leq u^T y, \quad \forall t \geq 0, \quad (5)$$

对于任意输入信号 u 成立, 则称该系统是无源的

定义3 对于系统(1), 如果存在正定函数 $V(x)$, 使式(5) 严格成立, 即对于给定的正定函数, $Q(x) > 0 (Q(0) = 0)$, 有

$$\dot{V} + Q(x) \leq u^T y, \quad \forall t \geq 0, \quad (6)$$

则称系统是严格无源的

3 系统模型

并联型有源电力滤波器(SAPF)的基本原理如图1所示

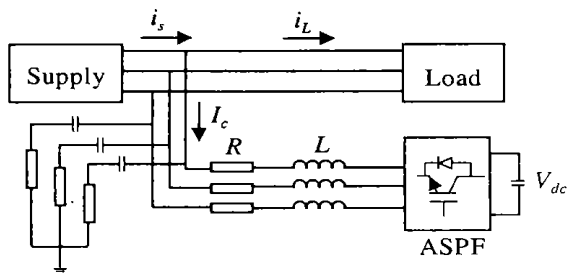


图1 SAPF的基本原理

将有源电力滤波器看成一个理想的电流源并联在支路上, 并对负载进行诺顿等效, 可得到图2所示

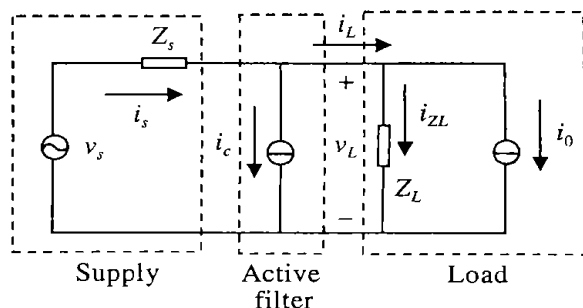


图2 SAPF的等效电路

的等效电路

在图2中, v_s 为电源电压, Z_s 为支路上的等效阻抗, i_c 为有源滤波器的输出电流. 通过电流控制, 可假定 i_c 能跟踪给定输入 i_c^* . 本文主要考虑如何通过无源性理论获得系统的给定补偿电流 i_c^* . 在负载的诺顿等效电路中, i_0 指负载中的各种畸变电流, Z_L 为负载的等效阻抗. 无论线路参数或负载参数, 都可能是未知的或变化的. 根据图2 可给出系统模型

$$\begin{cases} L_s \frac{d}{dt} i_s = -R_s i_s - v_L + v_s, \\ v_L = Z_L (i_s - i_c - i_0). \end{cases} \quad (7)$$

其中: L_s 为线路的电感, R_s 为线路的电阻

4 无源性控制策略

假设负载的等效阻抗为电容 C_L 和电阻 R_L 并联的结构, 则系统的模型可写成

$$\begin{cases} L_s \frac{d}{dt} i_s = -R_s i_s - v_L + v_s, \\ C_L \frac{d}{dt} v_L = -\frac{v_L}{R_L} + i_s - i_c - i_0 \end{cases} \quad (8)$$

利用 $d-q$ 变换理论, 可得到

$$\begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ v_{Ld} \\ v_{Lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & -\tilde{\omega}_s & -1 & 0 \\ \tilde{\omega}_s & -R_s & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -\frac{1}{R_L} & -\tilde{\omega}_L \\ 0 & 1 & \tilde{\omega}_L & -\frac{1}{R_L} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ v_{Ld} \\ v_{Lq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0d} \\ i_{0q} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

式中 ω 为工频角频率 设

$$x = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ v_{Ld} \\ v_{Lq} \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} -i_{cd} \\ -i_{cq} \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} v_{Ld} \\ v_{Lq} \end{bmatrix},$$

则系统模型为

$$\begin{cases} D\dot{x} = (J - R)x + Bu + Ew, \\ y = Cx. \end{cases} \quad (10)$$

式中

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -\tilde{\omega}_s & -1 & 0 \\ \tilde{\omega}_s & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & -\tilde{\omega}_L \\ 0 & 1 & \tilde{\omega}_L & 0 \end{bmatrix} = -J^T,$$

$$R = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/R_L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/R_L \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, C^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_L \end{bmatrix},$$

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, w = \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ i_{0d} \\ i_{0q} \end{bmatrix}.$$

定义能量存储函数

$$V(x) = \frac{1}{2} x^T D x = \frac{1}{2} L_s i_s^2 + \frac{1}{2} C_L v_L^2, \quad (11)$$

则

$$\dot{V} = -i_s^2 R_s + u^T y + v_s i_s - i_0 v_L - v_L^2 / R_L. \quad (12)$$

假设系统提供的能量 $v_s i_s$ 仅为负载消耗的能量 v_L^2 / R_L , 并且

$$\dot{V} < u^T y, \quad (13)$$

则 SAPF 系统满足无源性条件 按无源性理论设计

控制律, 令 $\tilde{i}_s = i_s - i_s^*$, $\tilde{v}_L = v_L - v_L^*$, i_s^* 和 v_L^* 分别为电源电流和负载电流的给定值, 则可得到误差模型

$$\begin{aligned} D\dot{\tilde{x}} &= (J - R)\tilde{x} + Bu + Ew - (D\dot{x}^* - (J - R)x^*) = \\ &= (J - R)\tilde{x} + \Psi \end{aligned} \quad (14)$$

式中

$$\tilde{x} = \begin{bmatrix} \tilde{i}_{sd} \\ \tilde{i}_{sq} \\ \tilde{v}_{Ld} \\ \tilde{v}_{Lq} \end{bmatrix}, x^* = \begin{bmatrix} i_{sd}^* \\ i_{sq}^* \\ v_{Ld}^* \\ v_{Lq}^* \end{bmatrix},$$

$$\Psi = Bu + Ew - (D\dot{x}^* - (J - R)x^*).$$

对于误差系统, 选取能量函数

$$V_1(x) = \frac{1}{2} \tilde{x}^T D \tilde{x} = \frac{1}{2} L_s \tilde{i}_s^2 + \frac{1}{2} C_L \tilde{v}_L^2, \quad (15)$$

$$\dot{V}_1 = -\tilde{x}^T R \tilde{x} + \tilde{x}^T \Psi \quad (16)$$

因为 R 是正定的, 所以只要适当设计控制器 u , 使 $\dot{V}_1 \leq 0$, 则系统是渐近稳定的, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{x} = 0$ 取 $\Psi = K\tilde{x}$, K 为负定矩阵, 便可满足要求 可获得误差模型

$$D\dot{\tilde{x}} = (J - R + K)\tilde{x}. \quad (17)$$

控制目标是保证电源电流中谐波和无功分量为零, $i_{sd}^* = I_d$, $i_{sq}^* = 0$ 其中: $I_d = P / \sqrt{v_{sd}}$ 为给定的电源电流值, P 为负载的额定功率 此时已实现解耦, 可使 I_d 与 d 轴方向重合 由电流的给定值得到电压的给定值: $v_{Ld}^* = v_{sd} - I_d R_s$, $v_{Lq}^* = v_{sq} - \tilde{\omega}_s I_d$, 则 $[I_d \ 0 \ v_{Ld}^* \ v_{Lq}^*]$ 为系统的期望平衡点 令

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k \end{bmatrix}, k > 0$$

由 $\Psi = K\tilde{x}$ 可获得控制律

$$\begin{aligned} i_{cd} &= -C_L \dot{v}_{sd} - \left(\frac{1}{R_L} - k \right) v_{sd} - \\ &\quad \tilde{\omega}_L v_{sq} + \left(\tilde{\omega}_L C_L L_s + \frac{R_s}{R_L} + \right. \\ &\quad \left. k R_s \right) I_d - i_{0d} - k v_{Ld}, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} i_{cq} &= -C_L \dot{v}_{sq} - \left(\frac{1}{R_L} - k \right) v_{sq} + \\ &\quad \tilde{\omega}_L v_{sd} + \left(-\tilde{\omega}_L R_s + \frac{\tilde{\omega}_s}{R_L} + \right. \\ &\quad \left. k \tilde{\omega}_s \right) I_d - i_{0q} - k v_{Lq} \end{aligned} \quad (19)$$

5 仿真结果

本文采用 MATLAB 的 SIMULINK 软件进行仿真。模型的参数选择如下: 电源为工频 220 V, 采用三相整流桥作为非线性负载; 在电源支路上, $R_s = 0.19 \Omega$, $L_s = 0.22 \text{ mH}$; 在滤波器支路上, $R_c = 0.2 \Omega$, $L_c = 0.5 \text{ mH}$; 直流侧电压为 800 V; 开关器件选用 IGBT, 开关频率为 15 kHz; PWM 采用三角波比较方式。

仿真结果如图 3 所示, 其中 (a), (b), (c) 分别为负载电流、电源电流和补偿电流。在负载变动的情况下, 对控制器进行动态仿真, 当 $t = 40 \text{ ms}$ 时, 人为加入一个变动负载; 当 $t = 60 \text{ ms}$ 时, 切除负载。其仿真结果如图 4 所示。由仿真结果可以看出, 当系统发生变动时, 控制器具有良好的稳定性和鲁棒性。

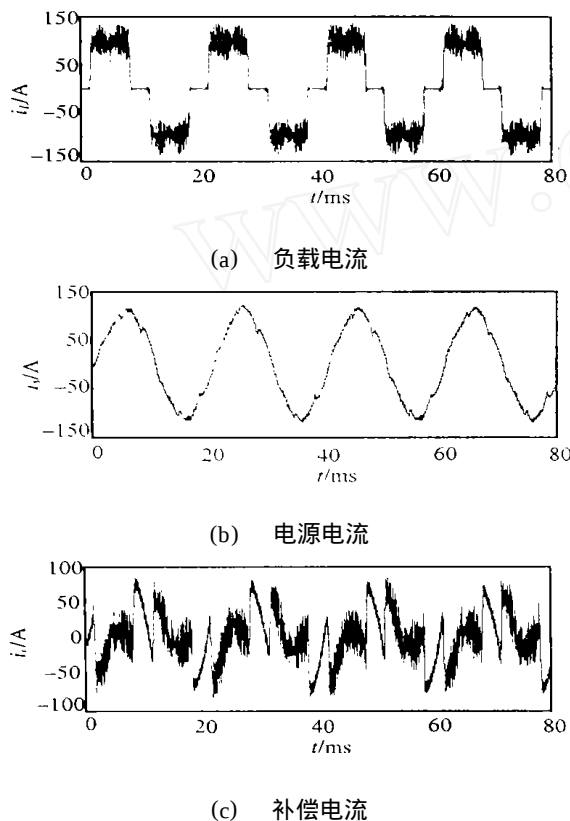


图3 电流仿真结果

6 结论

将无源性理论应用于电力电子装置, 能结合电力电子电路本身为无源的特点, 对系统进行分析和综合。对于有源电力滤波器, 可利用诺顿等效对负载电路进行简化, 使之成为一个简单的分立元件构成的电路。本文基于负载电压的检测, 通过能量重构和注入阻尼获得系统的控制律。该控制律具有简单易实现的特点。通过仿真结果可以看出, 该控制方法具

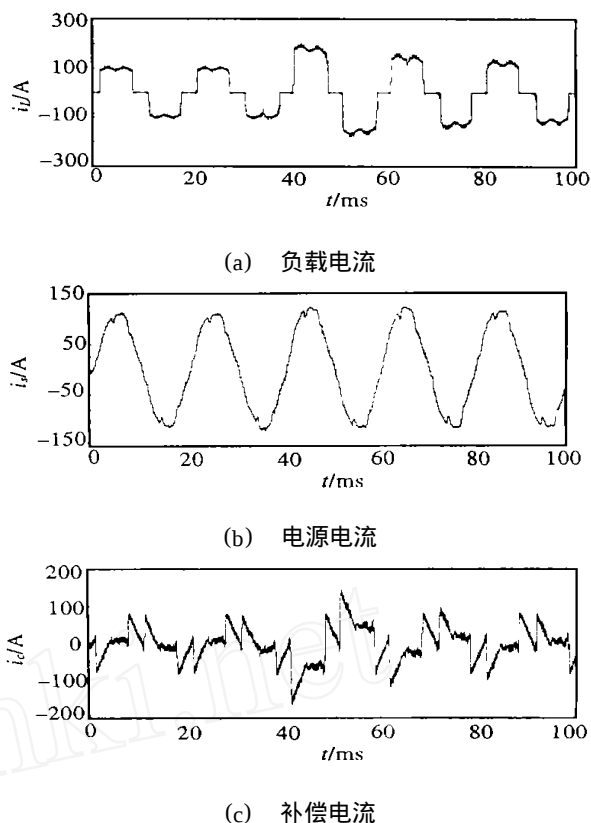


图4 负载变动时的仿真结果

有良好的稳定性和鲁棒性, 能保证系统在参数变化时仍具有较好的动态和静态响应。

参考文献(References):

- [1] Singh B, Al-Haddad K, Chandra A. A review of active filters for power quality improvement[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 1999, 46(5): 960-971.
- [2] Akagi H. New trends in active filters for power conditioning [J]. *IEEE Trans on Industry Applications*, 1996, 32(6): 1312-1322.
- [3] Akagi H. Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution system [J]. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1997, 12(1): 354-362.
- [4] 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]. *Trans of China Electrotechnical Society*, 1998, 13(1): 41-45.)
- [5] Ortega R, Schaft A J, Mareels I, et al. Putting energy back in control[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(2): 18-33.