

基于逆系统方法的单相并联 APF 控制策略研究

姜素霞, 安小宇, 李春文, 崔光照

(郑州轻工业学院河南省信息化电器重点实验室, 河南 郑州 450002)

摘要: 单相并联型有源电力滤波器是一个耦合的非线性系统。首先根据基尔霍夫定律建立系统的周期平均模型, 然后在平衡流形领域重构系统状态, 基于逆系统方法对重构后的系统模型进行反馈线性化, 得到解耦的伪线性系统。最后针对该伪线性系统采用线性二次型最优控制方法设计了满足一定性能指标的控制器。通过仿真实验, 验证了该控制器不仅可以保证闭环系统稳定, 同时还具有良好的动态补偿效果。仿真结果证明了文中所提方法的正确性和有效性。

关键词: 并联有源电力滤波器; 逆系统方法; 反馈线性化; 最优化控制

Control strategy study of single-phase parallel active power filter based on inverse system method

JIANG Su-xia, AN Xiao-yu, LI Chun-wen, CUI Guang-zhao

(Zhengzhou Institute of Light Industry Key Laboratory of Informationed Electric Apparatus in Henan Province, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The single-phase parallel active power filter is a coupled nonlinear system. Firstly, the system period averaging model is established based on Kirchhoff's law, then it is rebuilt at some neighborhood of the equilibrium manifold with respect to system states. And a coupled pseudo-linear model is given with feedback linearization based on the inverse system method. Finally, a linear quadratic optimal controller is designed to meet some performance target in terms of the pseudo-linear system. Simulation experiment verifies the controller not only ensures the stability of the close-loop system, but also owns an effective dynamic compensation. Simulation results illustrate the feasibility and validity of the proposed control strategy.

This project is supported by Key Project of National Natural Science Foundation of China (No.60433050).

Key words: parallel active power filter; inverse system method; feedback linearization; optimization control

中图分类号: TM76; TP13 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)06-0051-04

0 引言

随着微电子器件与电力电子技术的广泛应用, 电力系统中谐波问题日益严重。有源电力滤波器 APF (Active Power Filter) 以其良好的滤波性能成为解决电网波形畸变的一种有效滤波装置^[1-2]。它主要包括串联有源电力滤波器 SAPF (Series APF) 和并联有源电力滤波器 PAFP (Parallel APF), 前者主要用于补偿系统电压畸变, 后者主要用于补偿系统电流畸变、无功及功率因数校正, 并且 PAFP 也被认为是最早、最基本的有源滤波装置^[3]。

目前关于有源滤波器的研究甚多, 主要限于新型拓扑结构构建和控制策略研究等方面。APF 系统

模型大多都是采用统一建模方法, 即不考虑开关器件的通断而采用统一电路拓扑结构的稳态频域模型, 由此而得到 APF 的连续系统模型并进行控制策略研究。APF 的控制策略对其性能起决定作用, 国内外专家学者已经提出了多种不同的控制方法, 包括传统的单周控制、滞环电流控制、空间矢量控制和新型智能的自适应控制、滑动模控制、无源性控制、模糊控制、自抗扰控制、神经网络控制等^[4]。文献[5]提出了基于单周控制的 APF 双环控制策略, 文献[6]将滑模控制应用于单相有源电力滤波器中, 表明控制系统对参数变化具有不敏感性和较强的鲁棒性, 文献[7]将无源性理论应用于并联型 APF, 其控制律亦可以使系统具有良好的稳定性和鲁棒性。

文献[5~7]中控制器设计均是基于单相有源滤波器的瞬态模型建立的, 且属于非线性控制方法。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (60433050)

文献[8~10]虽属于新型智能控制方法,能避开建立精确数学模型,充分考虑系统的未知动态,但由于其理论在 APF 中的应用仍处在初级研究阶段,尚无应用实例。所以本文直接针对单相 PAFP 的非线性周期平均模型,基于逆系统方法^[12]对该耦合的非线性系统进行反馈线性化获得其解耦的伪线性系统,然后采用线性二次型最优控制方法设计了满足一定性能指标的控制。该控制方法简单,运算量小,易于实现且控制精度较高。仿真结果证明了本文所提方法的可靠性和有效性。

1 单相 APF 动态系统结构及数学模型

1.1 系统结构原理

单相并联型有源电力滤波器的结构示意图,如图 1 所示。

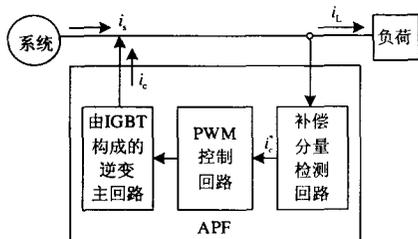


图 1 有源电力滤波器结构示意图

Fig.1 Structure of APF

由图 1 可知单相 APF 首先通过补偿分量检测电路得到需要补偿的谐波指令电流,然后通过控制算法计算出每个开关元件的闭合或断开时间,再通过 PWM 控制回路来物理实现对实际元件的控制,最后由构成的逆变主回路产生实际需要的补偿电流。

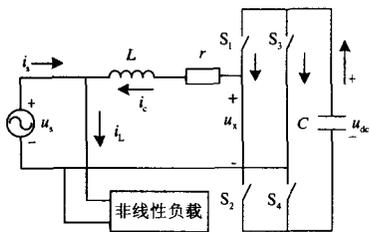


图 2 单相并联 APF 原理图

Fig.2 Schematic diagram of single-phase parallel APF

图 2 所示为单相有源滤波器等效原理图,其中 u_s 是电源电压无畸变,等效电阻 r 代替逆变器的开关损耗、滤波环节的有功损耗等,主电路及滤波装置的电抗用一个等效电感 L 代替。如令 i_c^* 为非线性负载电流中经过检测算法得到的高次谐波及无功电流分量,通过控制四个开关元器件 $S_1 \sim S_4$ 的开通与

关断,可使实际补偿电流 i_c 跟踪指令电流 i_c^* 。将 i_c 注入电网后非线性负载从电网中吸收的电流就只包含正弦有功分量,从而避免了负载对电网产生污染。

1.2 控制对象建模

由图 2 可得单相并联有源电力滤波器的周期平均模型为:

$$\begin{cases} L \frac{di_c}{dt} = -r \cdot i_c - d \cdot u_{dc} + u_s \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = -d \cdot i_c \end{cases} \quad (1)$$

其中: d 为周期等效占空比, $u_s = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ 为电源电压基波, U_m 为基波幅值。

并联有源电力滤波器的补偿目的是使系统电流只向负载提供基波有功分量,且与电源电压同相位。所以当系统补偿至平衡态时,应满足:

$$i_s^* = I_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

其中: i_s^* 为期望的系统电流,其幅值可以通过如下公式获得:

$$I_m = k_p(u_{dc} - U_{dc}) + k_i \int (u_{dc} - U_{dc}) dt \quad (3)$$

其中: U_{dc} 为直流侧电容电压参考值。由式(2)可知当系统电流期望值确定后,需要补偿的谐波及无功电流期望值亦确定,即

$$i_c^* = i_s^* - i_L \quad (4)$$

根据参考文献[11],为确定稳态补偿时单相 APF 的控制量,先作如下定义:当系统补偿电流等于期望值即满足公式(2),补偿后系统电流无畸变,APF 在一个工频周期内输出电压 u_x 对应的 PWM 脉宽函数 $D(t)$,称为单相 APF 系统的平衡波形,表示为:

$$\Psi_{D,x} = \{ (D(t), i_c^*(t)) | \Phi(D(t), i_c^*(t)) = 0, t \in \mathfrak{R} \} \quad (5)$$

Φ 为式(1)所对应的函数关系,由此平衡流形态时控制量为:

$$D(t) = (u_s - r \cdot i_c^* - L \cdot \frac{di_c^*}{dt}) / U_{dc} \quad (6)$$

在平衡流形领域对原系统模型(1)进行状态重构,令新的状态为: $x_1 = i_c - i_c^*$, $x_2 = u_{dc} - u_{dc}^*$; 控制输入为: $u = d - D$, 则重构后系统模型:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & -\frac{D}{L} \\ \frac{D}{C} & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} -\frac{u_{dc}}{L} \\ -\frac{i_c}{C} \end{bmatrix} u \\ y &= [1 \ 0] x \end{aligned} \quad (7)$$

2 控制器设计

2.1 基于逆系统方法的反馈线性化

通过在动态平衡流形领域的状态重构获得如式(7)的单相 APF 非线性系统模型, 本文采用逆系统方法构造其解耦的伪线性系统。根据文献[12]的求逆算法, 对输出求导可得

$$\dot{y} = \dot{x}_1 = -\frac{r}{L}x_1 - \frac{D}{L}x_2 - \frac{u_{dc}}{L}u \quad (8)$$

即
$$u = \frac{-rx_1 - Dx_2 - Ly}{u_{dc}} \quad (9)$$

根据逆系统理论方法可知, 系统是 $\alpha=1$ 右可逆的。令 $\dot{y} = \varphi$ 对式(10)进行变量替换, 可得逆系统为:

$$u = \frac{-rx_1 - Dx_2 - L\varphi}{u_{dc}} \quad (10)$$

2.2 线性二次型最优控制器设计

利用逆系统理论构建解耦的伪线性系统之后, 就可以利用多种已经发展成熟的线性控制策略来设计控制器。本文采用二次型最优控制理论设计单相 APF 的线性最优调节器, 因为它不仅能够克服测量噪声, 并能处理非线性干扰, 已成为反馈系统设计的一种重要工具。

综合式(8)、(9)、(10)可知, 该伪线性系统的状态空间表达式为:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}} &= \varphi \\ y &= \tilde{x} \end{aligned} \quad (11)$$

其中: \tilde{x} 为状态变量。

设计二次型目标为使如下加权的目标函数极小化:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (y^T Q y + \varphi^T R \varphi) dt \quad (12)$$

Q 和 R 分别是对输出变量和输入变量的加权矩阵, 且有 $Q^T = Q \geq 0$, $R^T = R$ 。由最优控制理论可知, 最优控制规律为:

$$\varphi = -K\tilde{x} \quad (13)$$

加权矩阵选取可使系统具有期望的闭环极点, 从而使系统具有期望的动态响应和鲁棒性能。本文取 $Q = [3]$, $R = [1]$, 调用 Matlab 中 lqr 函数来实现控制器的求解, 可得反馈控制律为:

$$\varphi = -1.732\tilde{x} \quad (14)$$

3 仿真研究

为验证本文所设计的二次型最优控制器的控制效果, 对单相并联 APF 系统在 Matlab 软件环境下进行仿真实验。模型参数选择如下: 电源电压为 $u_s = 220$ V, 等效电阻电感 $r = 3 \Omega$, $L = 10$ mH, 直流

侧电容 $C_{dc} = 4000 \mu F$, 其电压参考值为 $U_{dc} = 500$ 。

非线性负荷注入系统的谐波电流如表 1 所示。

表 1 谐波电流

Tab.1 Harmonic current						
次数 n	3	7	9	11	7.2	9.6
电流/A	3	2	1	0.3	0.5	0.5

仿真中通过检测可获得电源电压与负载电流的频谱特性, 进而根据公式(5)获得需要补偿的谐波电流期望值 i_c^* 。

为观察电流跟踪补偿由暂态到稳态的全过程, 从 $t=0$ 时刻开始进行补偿控制仿真实验。图 3 表示电源电压 u_s 为标准基波正弦波形, 无畸变。

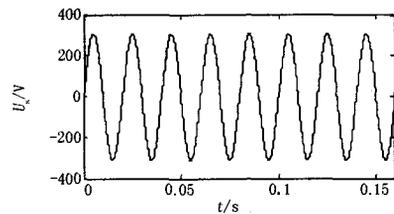


图 3 系统电压波形

Fig.3 System voltage waveform

图 4 为 PAF 投入运行前系统电流波形及频谱分析, 并且在 $t=0.15$ 时刻负载电流发生变化, 由图可知负载电流谐波畸变率为 27.37%。图 5 为 APF 输出补偿电流 i_c 波形, 包括负荷电流中的谐波分量和逆变器消耗的有功电流部分。图 6 为补偿开始后系统电流变化情况及频谱分析, 可以看出从 $t=0$ 时刻开始及 $t=0.15$ 时刻负载发生变化之后, 系统电流均可经过 2~3 个周波即进入稳态, 且补偿后波形畸变率降低至 2.24%。

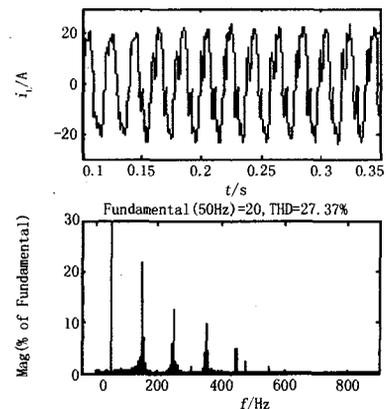


图 4 补偿前系统电流波形及频谱

Fig.4 System current waveform and spectrum before compensation

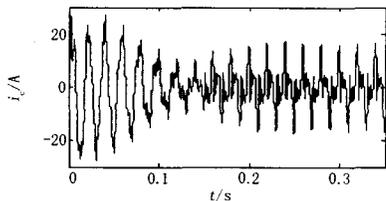


图5 APF 补偿电流波形

Fig.5 Compensate current waveform of APF

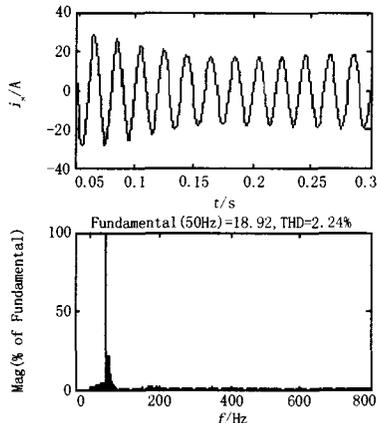


图6 补偿后系统电流波形及频谱

Fig.6 System current waveform and spectrum after compensation

由图7可知稳态时直流侧电容电压 u_{dc} 基本保持恒定。图8给出了补偿前后系统电流稳态波形对比,可以看出动态补偿效果良好。

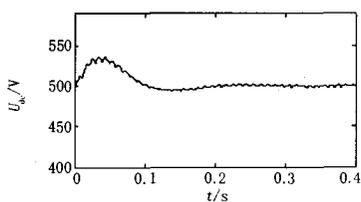


图7 直流侧电容电压波形

Fig.7 Capacitance voltage waveform

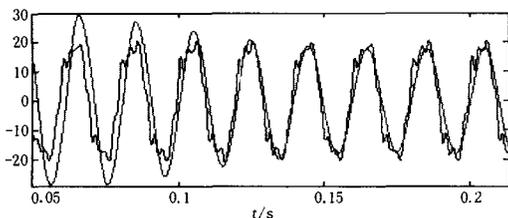


图8 补偿前后系统电流波形对比

Fig.8 Contrast of system current before and after compensation

4 结论

本文基于平衡波形和逆系统方法得到了单相

APF 的解耦伪线性系统,并针对该线性系统模型设计了线性二次型最优控制器。由仿真图形可以看出,该控制器可以在 2~3 个周波内将畸变率为 27.37% 的系统电流补偿至畸变率在 3% 以内的期望波形,并且在负载电流发生变化时,仍可实现快速的动态补偿和高精度的稳态补偿,具有良好的稳定性和动态性能。实验结果表明本文设计的控制器可以保证 APF 提供的补偿电流 i_c 能够快速准确地跟踪补偿指令信号 i_c^* ,并且在负载发生变化时亦具有良好的补偿效果。

参考文献

- [1] Gyugyi L, Strycula E C. Active AC Power Filters[A]. In: IEEE/IAS Annual Meeting[C]. Chicago: 1976.
- [2] Akagi H, et al. Instantaneous Reactive Power Compensation Comprising Switching Devices without Energy Storage Components[A]. IEEE Trans on IA, 1984, 20(3): 625-630.
- [3] Akagi H. New Trends in Active Filter for Improving Power Quality[A]. In: Proceeding of 1996 International Conference on Power Electronics, Drives and Energy System for Industrial Growth[C]. 1996.
- [4] 王伟, 周林, 徐明. 有源电力滤波器控制方法综述[J]. 继电器, 2006, 34(20): 81-86.
WANG Wei, ZHOU Lin, XU Ming. Control Methods of Active Power Filter[J]. Relay, 2006, 34(20): 81-86.
- [5] 钱挺, 吕征宇, 胡进, 等. 基于单周控制的有源滤波器双环控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 34-37.
QIAN Ting, LU Zheng-yu, HU Jin, et al. Dual-Loop Scheme for Unified Constant-Frequency Integration Control of Active Power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 34-37.
- [6] Miret J, de Vicuxia L C, Castilla M. A Single Sliding Mode Control of an Active Power Filter[A]. In: Power Electronics Specialists Conference[C]. 2004, 1052-1056.
- [7] 钟庆, 吴捷, 杨进明. 并联型有源电力滤波器的无源性控制[J]. 控制与决策, 2004, 19(1): 77-80.
ZHONG Qing, WU Jie, YANG Jin-ming. Passivity Based Control of the Shunt Active Power Filters[J]. Control and Decision, 2004, 19(1): 77-80.
- [8] YU Dong-mei, Guo Qing-ding, HU Qing, et al. A Novel DSP Based Current Controller with Fuzzy Variable-Band Hysteresis for Active Power Filters[A]. In: Transmission and Distribution Conference[C]. 2005, 1-5.
- [9] 付青, 罗安, 王莉娜. 基于自适应智能控制的混合有源电力滤波器复合控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 46-51.
FU Qing, LUO An, WANG Li-na. A Novel Hybrid Control Based the Adaptive Intelligent Theorems for the Shunt Hybrid Active Power Filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(14): 46-51.

(下转第 58 页 continued on page 58)

量列表等)的工具 MMS Object Foundry 和提供对 IEC GOOSE/GSSE 的支持。

3.2.3 利用ACSI建立模型

根据 IEC 标准的第八部分,GetServerDirectory、GetLDDirectory 和 GetLNDirectory 三个 ACSI 都被映射到 MMS 服务 GetNameList 上,而 GetDataDirectory 和 GetDataDefinition 两个 ACSI 则被映射到 MMS 服务 GetVariableAccessAttributes 上。而 MMS-EASE Lite 中分别提供了这两个 MMS 服务的 API,因此这些 ACSI 功能也就得到了实现,通过这些 ACSI 返回引用,可以获得数据类型名称,再调用如 3.1.3 中提到的 C#.NET 的动态类型创建功能创建对应类的实例。

4 结语

本文以距离保护功能为例的 IED 模型设计的基础上提出了两种模型建立的方法,并给出了具体实现的方案。当然,要实现整个变电站自动化系统还有构建实时数据库、历史数据库,设计监控界面等工作需要完成。

参考文献

- [1] 廖泽友,孙莉,贺岑,等.IED 遵循 IEC61850 标准的数据建模[J].继电器,2006,34(20):40-43.
LIAO Ze-you, SUN Li, HE Ling, et al. IEDs Data Modeling Based on IEC61850 Standards[J]. Relay, 2006,34(20):40-43.
- [2] 吴在军,窦晓波,胡敏强.基于 IEC61850 标准的数字保护装置建模[J].电网技术,2005,29(21):81-84.
WU Zai-jun, DOU Xiao-bo, HU Min-qiang. Modeling of Digital Protective Device According to IEC61850[J].

- Power System Technology, 2005, 29(21): 81-84.
- [3] 童晓阳,王勃,李映川,等.一种基于 IEC61850 的变电站智能电子设备的模型设计[J].继电器,2005,33(17):62-65.
TONG Xiao-yang, WANG Ren, LI Ying-chuan, et al. IEC Model Design in Substation Based on IEC61850[J]. Relay, 2005, 33(17): 62-65.
- [4] IEC 61850-7-2. Communication Networks and Systems in Substations - Part 7-2: Basic Communication Structure for Substation and Feeder Equipment - Abstract Communication Service Interface (ACSI): 2003[S].
- [5] IEC 61850-5. Communication Networks and Systems in Substations - Part 5: Communication Requirements for Functions and Device Models: 2003[S].
- [6] IEC 61850-6. Communication Networks and Systems in Substations - Part 6: Configuration Description Language for Communication in Electrical Substations Related to IEDs: 2004[Z].
- [7] MSDN Library. Microsoft Corp: 2005[Z].
- [8] IEC 61850-8-1. Communication Networks and Systems in Substations - Part 8-1 Specific Communication Service Mapping (SCSM) - Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3: 2004[S].
- [9] MMS-EASE Lite Reference Manual. SISCO: 2004[Z].

收稿日期: 2007-08-16; 修回日期: 2007-10-09

作者简介:

许振明(1983-),男,硕士,主要从事 IEC61850 等方面的研究; E-mail: xuzhenming168@163.com

翟富昌(1963-),男,高工,主要从事继电保护研究;
李绍滋(1963-),男,教授,博导,主要从事信息检索和变电站自动化系统等方面的研究。

(上接第 54 页 continued from page 54)

- [10] 童梅,董杰,蒋静坪.有源滤波器的神经网络控制[J].电工技术学报,2000,15(1):57-60.
TONG Mei, DONG Jie, JIANG Jing-ping. Active Filter with Neural Network Controller[J]. Electrician Technology, 2000, 15(1): 57-60.
- [11] 于达仁,隋岩峰.非线性系统平衡流形展开模型[J].系统仿真学报,2006,18(9):2415-2418.
YU Da-ren, SUI Yan-feng. Expansion Model Based on Equilibrium Manifold for Nonlinear System[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(9): 2415-2418.
- [12] 李春文,冯元琨.多变量非线性控制的逆系统方法[M].北京:清华大学出版社,1991.

LI Chun-wen, FENG Yuan-kun. The Inverse System Method for Multi-variable Nonlinear Control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1991.

收稿日期: 2007-07-09; 修回日期: 2007-10-15

作者简介:

姜素霞(1980-),女,硕士研究生,助教,主要研究方向为电能质量,自动控制理论及应用; E-mail: jiangsx@zzuli.edu.cn

李春文(1957-),男,省级特聘教授,博士生导师,主要研究方向为非线性系统分析与控制、电力系统控制、网络控制与运动控制等。