

文章编号:1671-6833(2013)04-0059-05

有源电力滤波器非线性控制策略研究与实现

慕 昆¹, 慕小斌², 王 杰³

(1. 河南工程学院 计算机科学与工程系, 河南 郑州 451191; 2. 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044;
3. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 电压型有源滤波器的数学模型呈现非线性特性, 采用带有电流预测的无源控制算法对有源滤波器的变流器进行控制, 可使其具备优良的动、静态特性. 建立了并网逆变器欧拉-拉格朗日 (Euler Lagrange, EL) 数学模型, 证明了电压型有源滤波器的逆变器是严格无源的, 因逆变器具有无源性, 所以可以控制能量在逆变器中的重新分布, 控制器对吸收有功电流和输出无功电流分别进行控制, 使系统能精确控制直流端电压以及快速精确跟踪负载的谐波电流、基波无功电流; 然后采用计算机仿真和样机试验来进一步验证该算法的正确性, 结果表明所研究的非线性控制策略可使有源滤波器具有明显的补偿效果.

关键词: 有源滤波器; 预测电流; 谐波电流; 非线性控制; 无源控制

中图分类号: TN713.8 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2013.04.014

0 引言

变流器是有源电力滤波器的重要组成部分, 变流器所采用的控制策略优良与否直接影响到有源滤波器的补偿效果. 有源电力滤波器的变流器数学模型呈非线性特性, 但在传统的变流器控制方案中, 都是将其近似为线性系统来控制的, 这样的近似本身就给系统的控制带来了不确定性, 所以选用非线性的控制策略能从系统的本质特性上使控制更精确^[1-3]. 近年来研究人员对诸如滑膜变结构控制、无差拍控制等控制方法进行了研究^[4-5], 笔者所研究的无源控制其本质是能量控制, 所设计的控制器可使系统具有良好的动静性能指标. 系统模型可建立为基于 EL 的数学模型^[6-9]和基于 PCHD^[10-11]的数学模型, 笔者采用 EL 数学模型导出无源控制算法, 且从能量的角度分析了有源电力滤波变流器的内部互连结构和耗散性, 最后从此角度去控制能量在系统中的重新分布. 仿真实验和样机试验均表明, 基于无源性的非线性控制策略使有源滤波器具有较好的补偿效果.

1 系统模型

1.1 有源电力滤波器拓扑结构

三相有源电力滤波器拓扑结构如图 1 所示. 如果忽略三相交流电网的内阻, 设输出电抗器 L 的电阻与逆变系统内阻等效为 R , 直流侧母线电压为 u_{dc} , i_{dc} 为流入变流器的电流, T1-T6 为 IGBT 开关管, S_a, S_b, S_c 为上桥臂开关驱动信号, $\bar{S}_a, \bar{S}_b, \bar{S}_c$ 为下桥臂开关驱动信号, u_a, u_b, u_c 为逆变侧三相交流相电压, i_a, i_b, i_c 为逆变输出三相线电流, u_{ea}, u_{eb}, u_{ec} 为电网侧三相交流相电压.

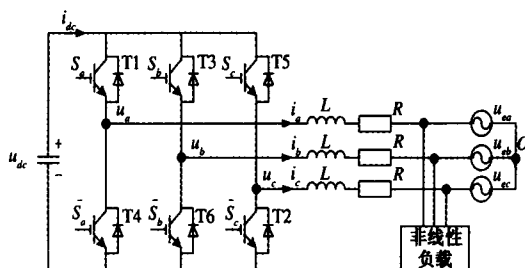


图 1 电力有源滤波器拓扑结构

Fig.1 The topology of APF system

收稿日期:2013-02-20; 修订日期:2013-04-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51077005)

作者简介:慕昆(1980-),男,河南郑州人,河南工程学院讲师,硕士,主要研究方向为非线性控制理论及应用以及计算机控制与自动化的研究;E-mail:mk_cooltest@163.com.

1.2 有源电力滤波器数学模型

由图1电力有源滤波器拓扑结构可知,在三相平衡电网电压情况下,变流器在三相 abc 坐标系中的数学模型为

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = -Ri_a + u_{dc}(S_a - \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} S_j) - u_{ea} = -Ri_a + u_a - u_{ea}; \\ L \frac{di_b}{dt} = -Ri_b + u_{dc}(S_b - \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} S_j) - u_{eb} = -Ri_b + u_b - u_{eb}; \\ L \frac{di_c}{dt} = -Ri_c + u_{dc}(S_c - \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} S_j) - u_{ec} = -Ri_c + u_c - u_{ec}; \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = -S_a i_a - S_b i_b - S_c i_c. \end{cases} \quad (1)$$

式中: S_a, S_b, S_c 为逆变器的开关函数, S_j 定义为单极性二值逻辑开关函数, $S_j(j = u, v, w) = 1$ 时,上桥臂导通,下桥臂关断, $S_j = 0$ 时,上桥臂关断,下桥臂导通。

由于在三相 abc 坐标系的数学模型中存在时变的三相正弦交流电压,为了便于控制器的设计,通过变换矩阵将其变换到两相同步旋转 dq 坐标系中,可得

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = -Ri_d + \omega Li_q + u_d - u_{ed}; \\ L \frac{di_q}{dt} = -Ri_q - \omega Li_d + u_q - u_{eq}; \\ \frac{2}{3}C \frac{du_{dc}}{dt} = -S_d i_d - S_q i_q; \\ u_d = S_d u_{dc}, u_q = S_q u_{dc}. \end{cases} \quad (2)$$

式中: S_d, S_q 为开关函数在 d, q 轴上的分量。

将式(2)写成 EL 的形式

$$M \dot{x} + Jx + \Re x = u. \quad (3)$$

式中: M 为正定的对角阵; J 为反对称矩阵,即 $J = -J^T$,反映了内部的互联结构; \Re 为对称正定矩阵,反映了系统的耗散特性;系统与外部能量交换由 u 表示。即

$$M = \begin{pmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2C}{3} \end{pmatrix}, \quad x = \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ u_{dc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}, u = \begin{pmatrix} -u_{ed} \\ -u_{eq} \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$J = \begin{pmatrix} 0 & -\omega L & -S_d \\ \omega L & 0 & -S_q \\ S_d & S_q & 0 \end{pmatrix}, \Re = \begin{pmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

1.3 系统的无源性^[7]

如果存在一个正定函数, $Q(x):R^n \rightarrow R$ 对 $\forall t > 0$ 时所有的 $u \in R^m$ 和所有的 $x_0 \in R^n$,使得下列耗散不等式

$$H(x_t) - H(x_0) \leq \int_0^t u^T y d\tau - \int_0^t Q(x) d\tau. \quad (4)$$

或

$$\dot{H} \leq u^T y - Q(x). \quad (5)$$

对系统的输入、输出以及能量供给率成立,则系统被称为是严格无源的, $u^T y$ 可解释为伴随着输入 u 由外部注入到系统的能量供给率, H 为系统能量的存储函数。式(4)、(5)被称为严格无源不等式。

由式(3),可设系统的存储函数为

$$H = \frac{1}{2} x^T M x. \quad (6)$$

则有

$$\dot{H} = x^T M \dot{x} = x^T (u - Jx - \Re x) = x^T u - x^T \Re x. \quad (7)$$

令 $y = x, Q(x) = x^T \Re x$,结合式(5),可以看出电力有源滤波变流器是严格无源的。

2 无源控制器设计及稳定性分析

选择系统的误差存储函数为

$$H_e = \frac{1}{2} x_e^T M x_e, x_e = x - x^*. \quad (11)$$

式中: x^* 为滤波器所期望的输出变量,即负载端谐波的负变量,谐波可以采用瞬时无功功率计算来获得。

由式(7)可看出系统的收敛速度与 \Re 的大小有密切联系,所以在此采用注入阻尼的方法来加快系统的能量耗散,从而加速系统收敛到期望点。

设 $\Re_e x_e = (\Re + R_e)x_e$,且称为阻尼耗散项,则式(3)可写为:

$$M \dot{x}_e + \Re_e x_e = u - (M \dot{x}^* + J(x^* + x_e) + \Re x^* - R_e x_e). \quad (12)$$

选择控制律

$$u = M \dot{x}^* + Jx + \Re x^* - R_e x_e. \quad (13)$$

可使系统能量误差收敛到零。根据式(13),注意 $M \dot{x}^*$ 具有预测电流的功能,抵消电抗器对电流的滞后影响。得到系统无源控制律为

$$\begin{cases} S_d = \frac{u_{ed} - L \dot{I}_{d-ref} - L \omega i_q + I_{d-ref}(R + R_{a1}) - R_{a1} i_d}{u_{dc}}; \\ S_q = \frac{u_{eq} - L \dot{I}_{q-ref} + L \omega i_d + I_{q-ref}(R + R_{a2}) - R_{a2} i_q}{u_{dc}}. \end{cases} \quad (14)$$

由此可看出系统已经解耦.

由于对负载电流中的谐波取反即是所需要的目标量,谐波的提取采用文献[12-13]中的提取办法.但是谐波的变化通常都是比较快,且无规律可寻,所以式(14)中, $L \dot{I}_{d-ref}$, $L \dot{I}_{q-ref}$ 就不能取为零,要用实际的值来计算,在此称其为电流预测值,用来弥补系统中的感性元件所引起的电流滞后.

对于闭环控制系统,对误差能量存储函数进行分析进而得出闭环系统的稳定性.由式(11)可得:

$$\dot{H}_e = \mathbf{x}_e^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{x}}_e \quad (15)$$

将式(13)代入式(12)可得

$$\mathbf{M} \dot{\mathbf{x}}_e + \mathfrak{R}_d \mathbf{x}_e = 0. \quad (16)$$

再将式(16)代入式(15)可得

$$\dot{H}_e = \mathbf{x}_e^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{x}}_e = -\mathbf{x}_e^T \mathfrak{R}_d \mathbf{x}_e \leq 0.$$

由此式可以看出次闭环系统是稳定的.

结合所得出的控制律得到基于无源控制的变流器结构框图如图 2 所示.

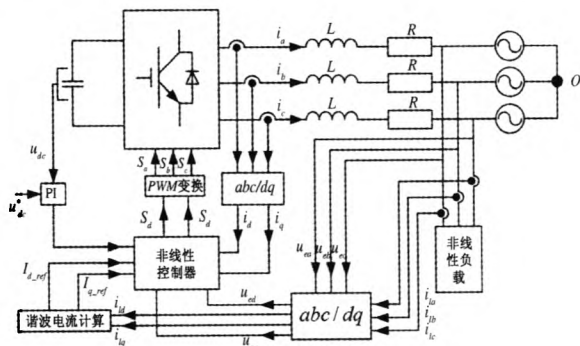


图 2 基于无源控制的结构框图

Fig.2 Structure diagram based on passivity control

3 仿真实验

用 MATALAB/SIMULINK 对系统进行仿真,设三相电网平衡相电压为 AC220 V,直流电压期望平衡到 800 V,逆变器输出端电抗器电感为 1,电抗器内阻和线路电阻为 0.2 Ω ,直流电容器为 6,非线性负载由三相全桥整流电路来模拟,直流侧电阻为 4 Ω ,在 0.12 s 加载到 2 Ω ,直流侧串联电抗为 0.6 mH.

图 3 为 PI 控制器用较好的参数时补偿前后的电流波形,可以看出由于 PI 控制器的控制带宽不够宽,有源滤波投入后源侧波形不够光滑.图 4

为对应于图 3 条件时的新控制器的控制效果.由此可以看出系统的动态特性较好.图 5 为对应于图 4 条件时的直流侧电压波形,由此图可以看出直流侧电压的抗扰动性能也比较明显.

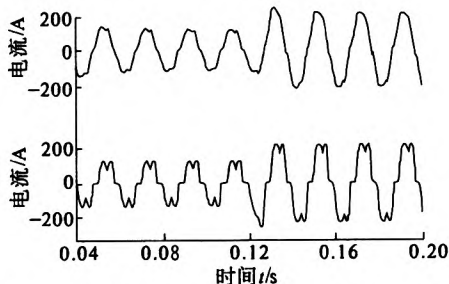


图 3 交流电流补偿前后波形对比 (PI 控制)

Fig.3 Comparing the current waveforms of AC before compensation and after compensation (PI controller)

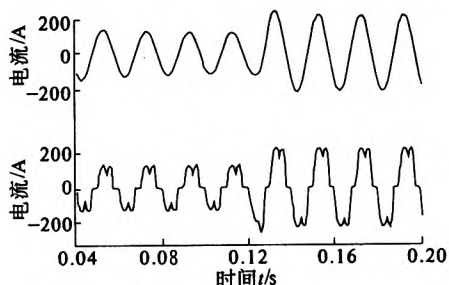


图 4 交流电流补偿前后波形对比 (新控制器)

Fig.4 Comparing the current waveforms of AC before compensation and after compensation (Innovative controller)

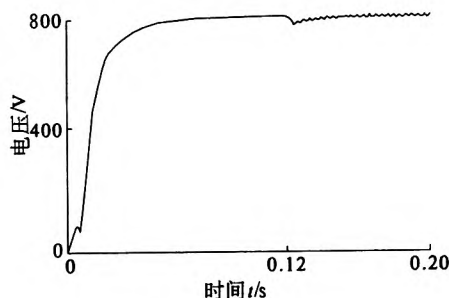


图 5 直流侧电压波形

Fig.5 The voltage waveforms of DC

4 样机实验

实验平台由 30 kVA 有源电力滤波器、三相不控整流桥电路(阻感负载)等组成.直流电压设置为 700 V,电容值为 6 mF,电抗器电感为 1 mH.实验测试仪器有 FLUKE434 电能质量分析仪,FLUKE 钳流表等.

当负载平均电流约为 200 A 时,补偿前交流电流波形如图 6 所示. 补偿后电流波形如图 7 所示,平均电流约为 193 A. 电流总谐波以及各奇次谐波量占基波量的比例如表 1 所示. 从图中可以看出系统在全功率补偿时,补偿效果较为明显,总谐波畸变率降低到了 2.9%,且补偿前后电流降低了 7 A 左右.

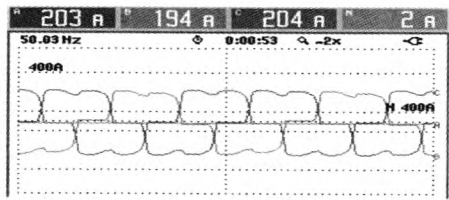


图 6 补偿前交流电流

Fig. 6 The current waveforms of AC before compensation

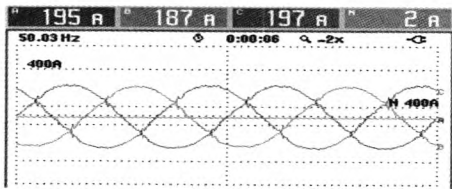


图 7 补偿后交流电流

Fig. 7 The current waveforms of AC after compensation

表 1 谐波含量分布

Tab. 1 Harmonic distribution %

项目	L1	L2	L3
THD	3.0	3.0	2.9
H3	0.2	0.2	0.1
H5	1.3	1.2	1.3
H7	0.8	1.1	1.1
H9	0.1	0.1	0.1

5 结 论

从仿真结果和样机试验效果来看,应用无源性非线性控制策略的有源滤波器具有较好的补偿效果. 且笔者所研究的有源电力滤波控制器结构简单,可调参数较少,调试方便容易,另外实际运行情况也表明此算法的应用有诸多优越性,此算法对其他相关的工程实施及相关领域的研究都具有相当的指导意义.

参考文献:

[1] 张发明,王俊,吴刚,等. 光伏并网逆变器的非线性

性控制研究[J]. 控制工程,2008,15(3): 295 - 298.

[2] 王江,曾启明. 非线性无源控制原理及在电力电子变换器中的应用[J]. 控制理论与应用,2004,21(4):574 - 578.

[3] 赵国生,魏志纲. 基于非线性 PID 控制的三相有源滤波器[J]. 郑州大学学报:工学版,2005,26(2): 14 - 17.

[4] TAI Tsang-li, CHEN Jian-shiang. UPS Inverter Design Using Discrete-time Sliding-mode Control Scheme [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002,49(1):67 - 75.

[5] 强文,黄西平,王鑫. 基于重复控制和无差拍控制的逆变电源数字控制技术研究[J]. 通信电源技术,2007,24(4): 14 - 17.

[6] LEE T S. Lagrangian modeling and passivity-based control of three phase AC/DC voltage-source converters [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics,2004,51(4):892 - 902.

[7] 慕小斌,王久和. 基于无源性的光伏并网逆变器非线性电流控制策略[J]. 电源学报,2011,36(4):83 - 87.

[8] ORTEGA R,LORIA A, NICKLASSON P J, et al. Passivity-based control of Euler-Lagrange systems: mechanical electrical and electromechanical applications [M]. Berlin,Genmany:Springer-Verlag, 1998.

[9] 王久和,慕小斌. 基于无源性的光伏并网逆变器电流控制策略[J]. 电工技术学报,2012,27(11): 176 - 182.

[10] MU Xiao-bin, WANG Jiu-he. Study on a nonlinear control strategy for three-phase voltage sources PWM DC/AC inverter based on PCH model [C]//ICEMS, 2011.

[11] ALEJANDRO D, SERGIO J. Energy shaping interconnection and damping assignment and integral control in the bond graph domain [J]. Simulation Modeling Practice and Theory, 2009,17:152 - 174.

[12] 杨柳,刘会金,陈允平. 三相四线制系统任意次谐波电流的检测新方法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(13): 41 - 44.

[13] 牟龙华,吕军,周伟. 基于序分量提取的无功和谐波电流同步坐标检测方法[J]. 中南大学学报:自然科学版,2011,42(2): 419 - 426.

Research and Realization of the Nonlinear Control Method Based on Active Power Filter

MU Kun¹, MU Xiao-bin², WANG Jie³

(1. Department of Computer Science and Engineering, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China; 2. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In view of the nonlinear mathematical model of the active power filter (APF) inverter, passivity - based control (PBC) with the function of forecasting current is adopted to control the inverter, and it can make the inverter possess excellent dynamic and static characteristics. First, we establish the Euler-Lagrange (EL) model of inverter, and we also prove that this inverter is strictly passive. Based on passivity of the inverter, we can redistribute the system energy to optimize the controller. The controller can make the reactive current of system to track the harmonic current of load, and active current can make the voltage of DC-link track the reference value fast. Simulation and prototype results show that the proposed control method is practicable and the compensation effect is obvious.

Key words: active power filter; forecasting current; harmonic current; nonlinear control passivity-based control

(上接第 58 页)

[2] 段海峰,李兴源,宋永华.一种基于模糊逻辑的电压无功控制策略[J].电力系统自动化,1997,21(6):23-26.

[3] 陈远华,秦荃华,杨晓红.基于模糊边界无功调节判据的电压无功综合控制[J].中国电力,2002,35(10):50-53.

[4] 胡国亮,陈久康.用 MATLAB 进行模糊控制器的设

计和仿真[J].基础自动化,2000,7(1):15-20.

[5] 杨丽徙,冯越,李桂红.大型工业企业配电网电压无功控制的研究[J].郑州大学学报:工学版,2009,30(4):108-111.

[6] 王克文,赵晓铎,刘晓峰.基于单纯形法思想的城市高压电网非线性无功优化[J].郑州大学学报:工学版,2010,31(5):95-98.

Substation Voltage and Reactive Power Fuzzy Controller Design

ZHAO Guo-sheng, DONG Yan-yan

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Since the voltage and reactive power are two key factors of the power quality evaluation, how to control the voltage and reactive power and making it within an acceptable range operation are of great significance. Voltage and reactive power control based on the traditional nine partitions exists oscillation question in switch operation, however, the fuzzy control method that the substation voltage and reactive power control can avoid these problems. A substation voltage and reactive power fuzzy controller is proposed in the paper according to fuzzy control strategy, and the MATLAB simulation are made on the fuzzy controller, the analysis results prove that the fuzzy controller designed in this paper can reduce the regulation numbers of transformer taps and shunt capacitors, meanwhile increase the service life of the substation equipment.

Key words: fuzzy control; voltage and reactive power; nine partitions