

基于 SVG 的电网功率因数控制系统

顾军, 王清灵, 郭家虎

(安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 针对非线性冲击负载引起的无功冲击大、功率因数低和谐波污染等电能质量问题, 提出了一种基于静止无功发生器(SVG)的电网功率因数控制系统方案。该系统由SVG与无源滤波器构成。无源滤波器实现滤波的同时, 还利用其固定的容性无功将感性范围的无功波动拉到从感性到容性范围的无功波动, 以减小SVG容量。系统通过瞬时无功功率闭环, 实现了功率因数的恒定控制和无功功率的无静差调节。为了使SVG实现解耦控制, 在SVG非线性模型的基础上, 利用逆系统构造出伪线性系统。考虑建模误差和参数漂移, 采用内模控制对伪线性系统进行综合。仿真结果证明该控制系统的正确性。

关键词: 电能质量; SVG; 无源滤波器; 逆系统; 功率因数控制; 内模控制

中图分类号: TM 714

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2011)02-0040-04

0 引言

提高和稳定功率因数、抑制谐波是近年来各方面关注的热点之一^[1-4]。生产过程中, 非线性冲击负载在规律性产生大量谐波的同时, 其无功功率和功率因数的波动呈周期性变化。在变化周期的不同阶段, 其功率因数有很大的不同, 无功功率的变化幅度也很大^[5]。关于功率因数控制的研究, 目前均采用无功完全补偿的方式, 使得功率因数为1^[2,6]。考虑到工矿企业的成本要求及供电部门的功率因数要求, 电网功率因数并不需要一定为1。针对这个情况, 本文提出通过瞬时无功功率闭环实现的功率因数控制方案。该方案利用无源滤波器的固定容性无功, 把无功波动从感性无功波动拉到从感性到容性范围内的无功波动, 以此充分发挥SVG的特点(可发容性无功也可发感性无功)来减小SVG的容量。另外, SVG是多输入多输出的非线性系统, 其无功电流、有功电流和输出电压之间存在耦合关系。在解耦控制上, 大多数控制方法都依赖于带补偿的线性控制器, 该方法在诸如具有大电容的特定条件下或者有限工作范围内才能正常工作^[7]。考虑到生产过程中无功功率波动范围大且剧烈, 为了补偿效果好, 应用逆系统方法对SVG进行解耦控制。在此基础上, 应用内模控制策略对已解耦的伪线性系统进行综合, 实现SVG高性能解耦控制。仿真验证了该控制系统的正确性。

1 功率因数控制系统

1.1 系统结构

基于SVG的电网功率因数控制系统结构图如图1所示。

收稿日期: 2010-03-21; 修回日期: 2010-12-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(50907001); 安徽省高等学校省级自然科学研究项目(KJ2009B141Z)

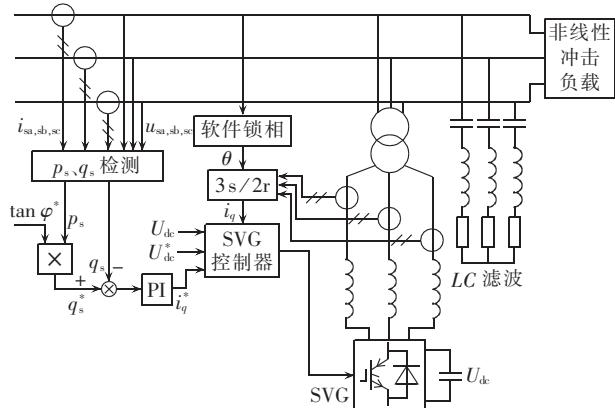


图1 基于SVG的电网功率因数控制系统结构图

Fig.1 Structure of SVG-based network power factor control system

1.2 无功闭环控制

供电系统的瞬时有功功率 $p_s = \frac{3}{2} u_{sd} i_{sd}$, 瞬时无功

功率 $q_s = -\frac{3}{2} u_{sq} i_{sq}$ 。其中, u_{sd} 为电压空间矢量 u_s 按其空间位置角 θ_s 定向的 d 轴分量; u_{sq} 为 u_s 按 θ_s 定向的 q 轴分量; i_{sd} 为电流空间矢量 i_s 按 θ_s 定向的 d 轴分量; i_{sq} 为 i_s 按 θ_s 定向的 q 轴分量。

根据 p_s 和期望的功率因数 $\lambda = \cos \varphi^*$, 求出瞬时无功功率期望值 $q_s^* = p_s \tan \varphi^*$ 。 q_s 为负载无功功率、滤波器的容性无功功率和SVG生成的无功功率 q 之和。无功补偿系统以 q_s^* 为给定, q_s 为反馈信号, 构成闭环调节系统。该闭环调节系统的PI调节器的输出 i_q^* 送给SVG控制器。此PI调节器可实现瞬时无功功率的无静差调节和功率因数恒定控制。

1.3 瞬时无功补偿系统的调节过程分析

图1中, p_s 为正值, q_s^* 为正值。 q_s 包含负载无功功率、滤波器的容性无功功率、SVG生成的无功功率 q , 因此, q_s 可能为正极性(感性), 也可能为负极性

(容性)。

当 q_s 为正极性时,若 $q_s < q_s^*$,则两者偏差量 $\Delta q_s > 0$,经图1中的PI调节器(其输出量极性与输入量相反)调节,使 i_q^* (负极性)增大。 i_q^* 作为SVG控制器的无功电流给定信号,经SVG控制器的调节,最终使 $q_s = q_s^*$;若 $q_s > q_s^*$,则 $\Delta q_s < 0$,经PI调节,使 i_q^* (负极性)减小,经SVG控制器的调节,使 i_q^* 减小,最终使 $q_s = q_s^*$ 。

若 q_s 为负极性,说明供电系统总的无功功率呈容性,此时 Δq_s 是很大的正极性,经图1中的PI调节, i_q^* 为负极性(此时SVG产生感性无功功率),并最终使 $q_s = q_s^*$ 。

2 SVG的非线性模型及控制策略

2.1 SVG的非线性数学模型

SVG主电路图如图2所示。

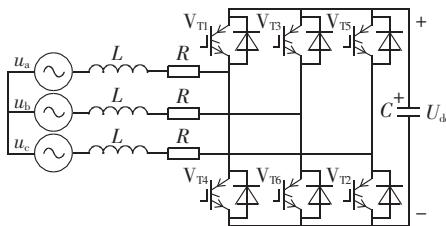


图2 SVG主电路图

Fig.2 Main circuit of SVG

定义开关函数 $s_k(k=a,b,c), s_k=1$ 表示上桥臂导通, $s_k=-1$ 表示下桥臂导通。SVG在dq坐标系下的非线性数学模型^[8]为

$$\begin{cases} u_d = R s_d i_d - \omega L i_q + L \frac{d i_d}{dt} + \frac{1}{2} s_d U_{dc} \\ u_q = R s_q i_q + \omega L i_d + L \frac{d i_q}{dt} + \frac{1}{2} s_q U_{dc} \\ \frac{d U_{dc}}{dt} = \frac{3}{4C} (s_d i_d + s_q i_q) \end{cases} \quad (1)$$

其中, u_d, u_q 分别为SVG网侧电压矢量的d、q轴分量; i_d, i_q 分别为SVG网侧电流矢量的d、q轴分量; s_d, s_q 为dq坐标系下的开关函数。

SVG的主要控制目标就是恒定的 U_{dc} 、快速的 i_q 跟随性能。由式(1)可见,在dq坐标系下,SVG的输入量为开关函数 s_d, s_q ,输出量为 U_{dc} 和 i_q ,故SVG是一个两输入两输出的非线性耦合系统,一般的线性控制理论很难实现其精确解耦控制。本文将采用逆系统方法,实现 U_{dc} 和 i_q 的精确解耦控制。

2.2 SVG的逆系统

选取系统状态变量 $x_1=i_d, x_2=i_q, x_3=U_{dc}$;系统输入控制量 $u_1=s_d, u_2=s_q$ 。

由式(1)可以推出SVG的非线性状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L}x_1 + \omega x_2 + \frac{u_d}{L} \\ -\frac{R}{L}x_2 - \omega x_1 + \frac{u_q}{L} \\ \frac{3}{4C}x_1 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{1}{2L}x_3 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2L}x_3 \\ \frac{3}{4C}x_1 & \frac{3}{4C}x_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据SVG主要控制目标,可选择系统输出变量 $y_1=i_q=x_2, y_2=U_{dc}=x_3$ 。对于一个给定的直流侧电压,选择 U_{dc} 和 i_q 作为输出变量进行全局稳定控制需要非常强烈的控制,这就有可能超过SVG的控制限制,导致物理上很难实现^[9]。为了避免这个缺点,可重新选择 $y_1=i_d=x_1, y_2=i_q=x_2$ 。通过跟随 i_d 的给定值来对 U_{dc} 进行间接控制,可达到 U_{dc} 恒定控制的目的,所需有功电流给定 i_d^* 可以通过SVG稳态值得到。

对SVG进行逆系统解耦控制,首先须求得SVG的 α 阶积分逆系统。利用逆系统求解方法^[10],对输出变量 y_1, y_2 进行 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_r$ 阶求导变换,直到出现输入控制量为止。可得:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L}x_1 + \omega x_2 + \frac{u_d}{L} \\ -\frac{R}{L}x_2 - \omega x_1 + \frac{u_q}{L} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{2L}x_3 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2L}x_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

显然,式(3)中的输入向量前的矩阵是非奇异的,故可将SVG原系统通过状态反馈化为 $\alpha=[1,1]$ 阶伪线性系统。对式(3)变换,可得SVG的逆系统方程为

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{2Rx_1}{x_3} + \frac{2\omega Lx_2}{x_3} + \frac{2u_d}{x_3} - \frac{2Ly_1}{x_3} \\ -\frac{2Rx_2}{x_3} - \frac{2\omega Lx_1}{x_3} + \frac{2u_q}{x_3} - \frac{2Ly_2}{x_3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

令式(4)中的变量 $y_1=\varphi_1, y_2=\varphi_2$,可得SVG α 阶积分逆系统($\alpha=[\alpha_1, \alpha_2]=[1,1]$)。

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{2Rx_1}{x_3} + \frac{2\omega Lx_2}{x_3} + \frac{2u_d}{x_3} \\ -\frac{2Rx_2}{x_3} - \frac{2\omega Lx_1}{x_3} + \frac{2u_q}{x_3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{2L}{x_3} & 0 \\ 0 & -\frac{2L}{x_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

将式(5)所示的 α 阶积分逆系统串联到原系统之前,可以得到SVG的伪线性系统,其传递函数矩阵可表示为 $\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/s & 0 \\ 0 & 1/s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix}$ 。可见,原系统通过串联其逆系统,被分解成2个无耦合关系的子系统,可按2个单变量线性系统进行控制器的设计。

2.3 内模控制

由于参数变化和建模误差等原因,可能导致使用逆系统方法实现的控制器鲁棒性较差。为了提高系统的鲁棒性以及动态响应特性,以伪线性系统为对象进行内模控制。可取内部模型 $G_m(s) = \begin{bmatrix} 1/s & 0 \\ 0 & 1/s \end{bmatrix}$, 内模控制器 $G_c(s) = F(s)G_m^{-1}(s)$ 。选取滤波器 $F(s) = [h/(s+h)]^n$, 使 $G_c(s)$ 正则, 其中 h 为设计闭环控制系统的带宽。设扰动为零, 则闭环系统的误差方程为 $E(s) = \frac{1-F(s)}{1+F(s)G_m^{-1}(s)[G(s)-G_m(s)]}R(s)$, 其中, $G(s)$ 为伪线性系统传递矩阵; $R(s)$ 为内模控制的输入矩阵。对于阶跃输入, 取 $n=1$, 可得 $e(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \{ [1-F(s)] / [1+F(s)G_m^{-1}(s)(G(s)-G_m(s))] \} R(s) = 0$ 。可见, 系统可实现无静差跟踪阶跃信号, 并可完全抑制恒值扰动。

利用内模控制器 $G_c(s)$, 可使系统输出按照预定的轨迹跟踪得到 $r_1=i_q^*, r_2=i_d^*$ 。下面讨论如何得到这两个给定值。

SVG 的有功功率 $p = \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q)$, 无功功率

$q = \frac{3}{2}(u_q i_d - u_d i_q)$ 。在以电网电压空间矢量定向的 dq

坐标系中, $u_q = 0$, 而 $u_d = U_m$ 是电网电压的峰值, 这样 SVG 的 p 和 q 就可以通过控制 i_d, i_q 来间接实现, 其中 i_d 控制 p (直流侧电压), i_q 控制 q 。当 i_d, i_q 控制在相应的给定值时, 就可以间接地实现控制 p 和 q 的目的。

忽略 SVG 的损耗, 根据其功率平衡关系可得 $i_d = \frac{C}{3u_d} \frac{d}{dt} U_{dc}^2$, 可计算出 U_{dc}^* 所对应的 i_d^* 。寄生参数的存在和电路参数的变化, 会导致计算出的 i_d^* 有些偏差, 从而导致 U_{dc} 有所偏差。为了达到良好的跟踪特性和较强的鲁棒性, 可以使用 PI 控制器来控制 i_d^* 。 q 可通过控制 i_q 来实现, i_q^* 的生成如图 1 所示。综上所述, 可得 SVG 的逆系统内模控制规律, 其控制框图见图 3(图中, 虚框部分表示伪线性系统)。

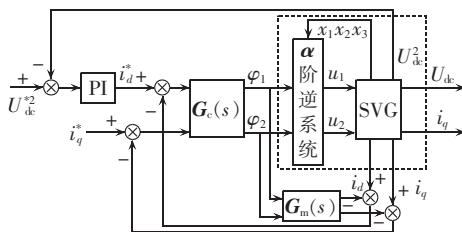


图 3 SVG 控制框图

Fig.3 Block diagram of control system for SVG

3 参数选择

3.1 SVG 容量选择

根据负载每日 p_s, q_s 的记录波形以及 $\cos \varphi^*$, 确

定所需补偿的无功功率 $q_\Sigma^* = \tan \varphi^* p_s - q_s$ 。在工频下, LC 滤波器为容性, 其容性无功 $Q_C = \frac{1}{2} q_{\Sigma_{\max}}^*$, $q_{\Sigma_{\max}}^*$ 为 q_Σ^* 的每日最大值。故 SVG 的容量 $q = q_C = \frac{1}{2} q_{\Sigma_{\max}}^*$ 。

3.2 无源滤波器选择

若无源滤波器为 N 个通道, 则每个通道的工频无功功率 q_i 为 $q_i = \frac{1}{N} q_C$ 。 q_i 与电容 C 的关系为 $C = \frac{q_i}{U^2 \omega} = \frac{q_C}{NU^2 \omega}$, 其中, U 为母线线电压有效值; ω 为工频电压角频率; C 为星形接法的电容, 各次滤波通道的电容是相同的。 $L = 1 / [(n\omega)^2 C]$, n 为谐波次数。

4 系统仿真及分析

为验证本文系统的正确性, 以直流矿井提升系统这一典型非线性冲击负载为研究对象。直流提升系统的主要参数如下: 整流变压器一次线电压为 10 kV, 二次线电压为 900 V, 直流电动机额定电压为 800 V, 额定功率为 2000 kW, 额定转速为 51.5 r/min。

4.1 未加滤波和无功补偿时的仿真结果

未加滤波和无功补偿时的仿真结果如图 4 所示。

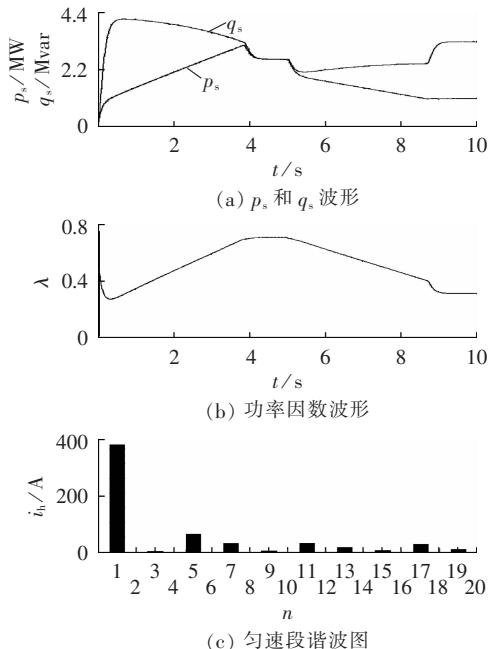


图 4 未加滤波和无功补偿时的相关波形

Fig.4 Related waveforms without filter and reactive power compensation

由图 4(a)可见, 在加速段, q_s 从起车时的 0 kvar 迅速上升到 0.7 s 时的 4.2 kvar, 短时无功冲击非常大; 在减速段, q_s 在 5.5 s 时下降到最低, 但仍有 2.1 kvar; 其余时间, q_s 在 4.2 kvar 与 2.1 kvar 之间大范围波动。由图 4(b)可见, 功率因数波动大且低, 整个提升周期的平均功率因数很低, 仅 0.5~0.6 左右; 爬行段功率因数仅 0.3。实际系统中, 为了停车的准

确性,爬行速度往往更低,这势必导致功率因数更低。由图4(c)可见(n 为谐波次数;下同),电流的谐波成分非常大,主要为5、7、11、13次谐波。

4.2 加入LC滤波器后的仿真结果

设置5、7、11、13次滤波通道,每个滤波通道的工频容性无功功率 Q_i 为600 kvar。电网母线电压为10 kV。根据第3.2节,可得每个滤波通道的电容值和电感值。加入LC滤波器后的仿真结果如图5所示。

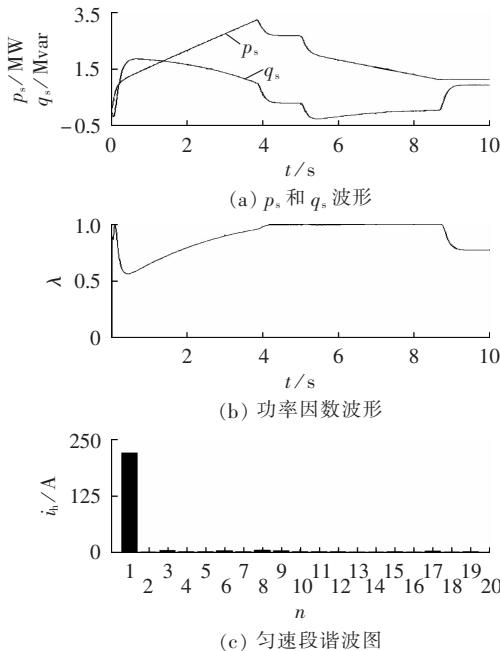


图5 加入滤波环节后的相关波形
Fig.5 Related waveforms with filter

由图5(a)可见,加入滤波环节后,利用无源滤波器的容性,将图5(a)中波动的无功功率曲线向容性方向下拉。整个提升周期内, q_s 从感性到容性波动,且波动范围很大。从图5(b)可看出,功率因数得到提高,但并不稳定,上下波动很大,还不能满足供电部门的用电要求。由图5(c)可见,加入滤波环节后,5、7、11、13次谐波电流明显减小。

4.3 加入无功补偿装置和LC滤波器后的仿真结果

由图6(a)可见,采用瞬时无功补偿后,无功功率的冲击现象得到有效抑制,无功功率曲线和有功功率曲线形状一致,只是幅值较小,仅为有功功率曲线幅值的0.48。这是由于功率因数的给定值为0.9所致。由图6(b)可见,功率因数基本稳定在设定的0.9,仅在负载剧烈变动时,功率因数才存在较小的跟随偏差。对比图5(a)和图6(a),SVG瞬时补偿的无功功率非常大,且波动剧烈。通过逆系统内模控制策略,SVG动态补偿效果良好。

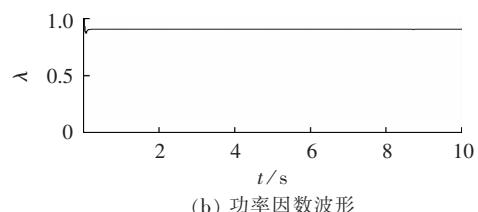
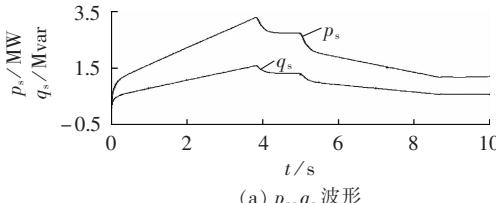


图6 加入无功补偿和滤波后的相关波形

Fig.6 Related waveforms with filter and reactive power compensation

5 结语

a. 考虑到企业成本要求和供电部门的用电要求,基于SVG的电网功率因数控制系统通过无功闭环实现了可设定的功率因数控制,通过对直流矿井提升系统这一典型负载仿真,证明该控制方案适合非线性冲击负载,减小了无功冲击和谐波污染。

b. 在建立SVG的非线性数学模型的基础上,提出了SVG的逆系统内模控制策略。仿真结果表明该控制策略实现了直流侧电压和无功电流的完全解耦控制,极大改善了SVG的稳态及动态性能,使SVG可以快速、有效地对非线性冲击性负载进行无功补偿。

参考文献:

- [1] 刘水强,张颖,陈继业. 基于同步坐标系的有源电力滤波器检测策略[J]. 电力自动化设备,2009,29(11):41-44.
LIU Shuiqiang,ZHANG Ying,CHEN Jiye. Detection strategy for APF based on synchronous-reference-frame method [J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(11):41-44.
- [2] 龚锦霞,卢婧婧,解大,等. 一种新型动态无功补偿器的控制算法[J]. 电力自动化设备,2009,29(5):89-93.
GONG Jinxia,LU Jingjing,XIE Da,et al. Control strategy for dynamic var compensation[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(5):89-93.
- [3] 吕军,牟龙华. 基于预充电的电容器组投切控制策略[J]. 电力自动化设备,2009,29(6):62-66.
LÜ Jun,MU Longhua. Shunt capacitor bank switching strategy based on precharge circuit[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(6):62-66.
- [4] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制与无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,2002:1-8.
- [5] 梁汉湘,尹项根,刘建. SVG控制系统的稳定性研究[J]. 电力自动化设备,2004,24(4):8-11.
CHENG Hanxiang,YIN Xianggen,LIU Jian. Research of SVG control system stabilization[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(4):8-11.
- [6] 庄淑瑾,孙玉坤,任明伟,等. 静止无功发生器的预测电流控制方法SVG控制系统的稳定性研究[J]. 电力自动化设备,2008,28(11):53-55.
ZHUANG Shujin,SUN Yukun,REN Mingwei,et al. Predictive current control method of static var generator[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(11):53-55.
- [7] 郭家虎,张鲁华,蔡旭. 三相电压型PWM整流器的逆系统内模控制[J]. 煤炭科学技术,2009,37(2):70-75.
GUO Jiahua,ZHANG Luhua,CAI Xu. Inner model control of inverse system for three phase voltage mode PWM rectifier [J]. Coal Science and Technology,2009,37(2):70-75.
- [8] 张加胜,张磊. 四象限变流器的一种统一性建模及分析方法研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(8):39-44.

ZHANG Jiasheng,ZHANG Lei. Research on a general unified modeling and analysis approach of 4-quadrant converters[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(8):39-44.

[9] KOMURCUGIL H,KUKRER O. Lyapunov-based control for three phase PWM AC / DC voltage-source converters[J]. IEEE Trans Power Electr,1998,13(5):801-813.

[10] 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,1991:98-103.

(实习编辑: 李 莉)

作者简介:



顾军(1978-),男,安徽淮南人,讲师,博士研究生,研究方向为电力电子技术在电能质量控制中的应用(E-mail:jungu@126.com)。

SVG-based network power factor control system

GU Jun,WANG Qingling,GUO Jiahu

(College of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Aiming at large reactive power impact, low power factor and harmonic pollution caused by nonlinear impacting loads, a SVG-based network power factor control system is proposed, which consists of SVG and passive filter. Besides filtering, the passive filter also changes the inductive reactive power fluctuation into the inductive-to-capacitive reactive power fluctuation by using its fixed capacitive reactive power, which decreases SVG capacity. The closed loop control of instantaneous reactive power is used to realize the constant power factor and suppresses the reactive power impact. In order to realize decoupling control, the pseudo linear system is constructed based on its nonlinear mathematical model with its inverse system. With the consideration of modeling error and parameters drift, the inner model control method is applied to synthesize the pseudo linear system. Simulative results confirm the feasibility of the control system.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China(50907001) and the Program of Higher Education Institution Natural Science Foundation of Anhui Province(KJ2009B141Z).

Key words: power quality; SVG; passive filter; inverse system; power factor control; inner model control