

文章编号: 1671- 251X(2010) 08- 0081- 04

基于滑模控制的三相四线制电力有源滤波器

张明光, 侯志军, 刘 淼

(兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 建立了采用四桥臂逆变器为主电路的三相四线制电力有源滤波器的数学模型。该电力有源滤波器基于滑模的控制策略, 采用指数趋近律的方法以减少抖动的影晌。Matlab 仿真结果表明, 基于滑模控制策略的三相四线制电力有源滤波器具有很好的谐波抑制性能。

关键词: 三相四线制系统; 有源滤波器; APF; 滑模控制; 指数趋近律; 谐波抑制

中图分类号: TD611. 5; TM46 **文献标识码:** A

Active Power Filter for Three-phase Four-wire System Based on Sliding Mode Control

ZHANG Ming-guang, HOU Zhi-jun, LIU Miao

(College of Electrical and Information Engineering of Lanzhou University of Technology,
Lanzhou 730050, China)

Abstract: The paper built the mathematic model of active power filter(APF) for three-phase four-wire system by use of four-legged inverter as main circuit. The APF is based on sliding mode control strategy, which uses the exponential reaching law to eliminate chattering. The simulation results in Matlab showed that the APF for three-phase four-wire system with the slide mode control strategy has good performance of harmonic suppression.

Key words: three-phase four-wire system, active power filter, APF, sliding mode control, exponential reaching law, harmonic suppression

0 引言

随着电力电子技术的不断发展, 越来越多的电力电子装置被广泛应用于各种领域, 同时也将大量的谐波注入电网。电网中谐波的危害极大, 它会使电网供电电压波形发生畸变而使供电质量下降, 电力系统的能量损耗增加、供用电设备寿命缩短, 还会对其它电子设备造成电磁干扰。

收稿日期: 2010- 04- 08

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目(2007GS04834)

作者简介: 张明光(1971-), 男, 甘肃民勤人, 教授, 主要研究方向为控制理论与控制工程、电力系统及其自动化等。E-mail: hzj8921259@ 163. com

- [5] ZHAN Changjiang, FITZER C, RAMACHAN D V K, et al. Software Phase Locked Loop Applied to Dynamic Voltage Restorer[C] // IEEE Proceedings of PES Winter Meeting, 2001, Columbus: 1033- 1038.
- [6] 肖湘宁, 徐永海, 刘连光. 考虑相位跳变的电压凹陷动态电压补偿控制器研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 64- 69.
- [7] 梁海涛, 苏建徽, 张国荣. 基于三相软件锁相环的动态电压恢复器的研究[J]. 金陵科技学院学报, 2005, 21(4): 22- 25.
- [8] 李钟慎. 基于 MATLAB 设计巴特沃斯低通滤波器

- [J]. 信息技术, 2003, 17(3): 49- 52.
- [9] 方培本. 利用双线性变换法设计 IIR ButterWorth 数字滤波器[J]. 天津理工学院学报, 1999, 15(5): 41- 43.
- [10] 柳春锋. 用 MATLAB 语言实现 IIR 滤波器的设计[J]. 齐齐哈尔大学学报, 2001, 17(4): 51- 54.
- [11] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [12] 袁兆祥, 郑建勇, 胡敏强, 等. 有源滤波器中新型检测滤波器设计[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(9): 43- 49.

电力有源滤波器 (Active Power Filter, APF) 是目前谐波抑制和无功补偿比较常用的器件。APF 具有高度可控制和快速响应特性, 并且能跟踪补偿各次谐波、自动产生所需变化的无功功率, 其特性不受电力系统影响, 无谐波放大危险, 相对体积重量较小, 已成为电力谐波抑制和无功补偿的重要手段^[1]。但目前大部分 APF 都是针对三相三线制电路。而我国现在大部分的低压线路采用的大多是三相四线制, 所以笔者设计了针对三相四线制的 APF。三相三线制和三相四线制的差别: 三相四线制 APF 除了补偿 A、B、C 三相的谐波以外, 还要补偿中性线上的电流, 以消除电源侧的中性线电流, 并使三相电流对称, 从而使电力系统三相电流平衡。

APF 中最关键的就是控制部分。APF 的主电路为 PWM 逆变器, 其本身结构就在电力电子器件通断过程中变化, 所以笔者采用滑模变结构控制来控制 APF。

滑模变结构控制本质上就是随着系统的变化, 根据当前系统状态、系统的各阶导数和偏差等, 使系统按照设计好的“滑动模式”状态轨迹运动。由于滑动模式可以进行设计并且与对象参数及扰动无关, 这就使得变结构控制具有快速响应、对参数变化及扰动不灵敏、无需系统在线辨识、物理实现简单等优点^[2-3]。

1 三相四线制 APF 设计

1.1 主电路的拓扑结构

三相四线制 APF 主电路常用的拓扑结构有 2 种: (1) 以三相四桥臂逆变器为主电路, 如图 1 所示; (2) 以三桥臂电容中点式逆变器为主电路, 如图 2 所示^[4-5]。

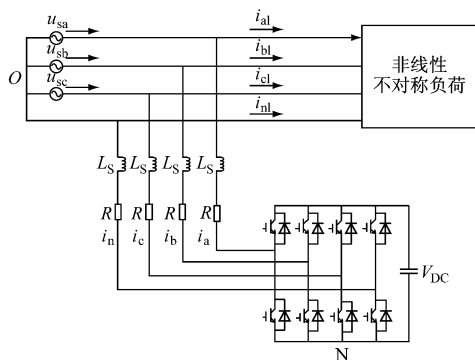


图 1 以三相四桥臂逆变器为主电路的 APF 拓扑结构

以四桥臂逆变器作为主电路的拓扑结构, 分工明确, 各相补偿电流的产生和中性线电流的补偿可以看作是由各对桥臂独立完成的, 对主电路的整体

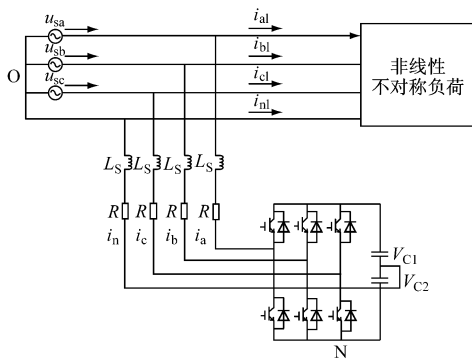


图 2 以三桥臂电容中点式逆变器为主电路的 APF 拓扑结构

控制系统可看成是一个四相电流跟踪控制系统, 所以控制系统相对简单明了。以三桥臂电容中点式逆变器为主电路的拓扑结构虽然需要的电力电子器件数目少, 但为了使直流侧的电容电压 V_{C1} 、 V_{C2} 相互平衡, 则需要对这 2 个电压的差值进行控制, 使得控制电路的组成相对复杂一些。本文设计的滤波器采用三相四桥臂的拓扑结构。

1.2 四桥臂拓扑结构的数学模型

这里设电力系统三相电源和网络结构对称稳定。引入变量 S_i :

$$S_i = \begin{cases} 1 & (\text{上桥臂导通, 下桥臂关断}) \\ -1 & (\text{上桥臂关断, 下桥臂导通}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i = a, b, c, n$ 。

根据基尔霍夫电压定律可得

$$L_s \frac{di_a}{dt} + Ri_a = u_{sa} - (V_{DC}S_a + V_{NO}) \quad (2)$$

$$L_s \frac{di_b}{dt} + Ri_b = u_{sb} - (V_{DC}S_b + V_{NO}) \quad (3)$$

$$L_s \frac{di_c}{dt} + Ri_c = u_{sc} - (V_{DC}S_c + V_{NO}) \quad (4)$$

$$L_s \frac{di_n}{dt} + Ri_n = - (V_{DC}S_n + V_{NO}) \quad (5)$$

式中: V_{DC} 为逆变器直流侧电容电压; V_{NO} 为逆变器下面 4 个 IGBT 的共阳极端与电源中性点之间的电压。

因为电力系统三相对称稳定, 有

$$\begin{cases} u_{sa} + u_{sb} + u_{sc} = 0 \\ i_a + i_b + i_c = -i_n \end{cases} \quad (6)$$

由式(2)~(5)得

$$V_{DC}(S_a + S_b + S_c) = 4V_{NO} \quad (7)$$

$$V_{NO} = \frac{V_{DC} \sum_{i=a,b,c,n} S_i}{-4} \quad (8)$$

设 $S_m = \frac{\sum_{i=a,b,c,n} S_i}{-4}$, 在电容的正极处采用基尔霍

夫电流定律可得

$$C \frac{dV_{DC}}{dt} = i_a S_a + i_b S_b + i_c S_c + i_n S_n \quad (9)$$

将式(2)~式(9)写成矩阵形式,就得到了四桥臂的数学模型:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (10)$$

其中: $x = [i_a \ i_b \ i_c \ i_n \ V_{DC}]^T$;

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_s} & 0 & 0 & 0 & \frac{S_m - S_a}{L_s} \\ 0 & -\frac{R}{L_s} & 0 & 0 & \frac{S_m - S_b}{L_s} \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L_s} & 0 & \frac{S_m - S_c}{L_s} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{R}{L_s} & \frac{S_m - S_n}{L_s} \\ \frac{S_a}{C} & \frac{S_a}{C} & \frac{S_a}{C} & \frac{S_a}{C} & 0 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$u = [u_{sa} \ u_{sb} \ u_{sc} \ 0 \ 0]^T。$$

1.3 检测电路

采用 i_p 、 i_q 方法来检测谐波电流^[6], i_p 、 i_q 法主要是用于对三相三相制线路,笔者对其稍加改进使其适用于三相四线制电路。因为三相四线制系统中有 $i_a + i_b + i_c = i_n$, 所以将原始电流中减去中性线电流可得到新的电流:

$$\begin{cases} i'_a = i_a - i_n \\ i'_b = i_b - i_n \\ i'_c = i_c - i_n \end{cases} \quad (11)$$

这里得到的 i'_a 、 i'_b 、 i'_c 就可以用 i_p 、 i_q 方法来检测其谐波电流。

2 滑模控制策略

基于滑模控制的 APF 的控制框图如图 3 所示。

本文采用趋近律来设计滑模控制器。滑模趋近律一般有 4 种类型:等速趋近律、指数趋近律、幂次趋近律、一般趋近律。这里采用指数趋近律:

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn} s - ks \quad \varepsilon > 0, k > 0 \quad (12)$$

因为指数趋近律可以通过减小 ε 增大 k 来使趋近加快,而且因为按照指数趋近律到达切换面时

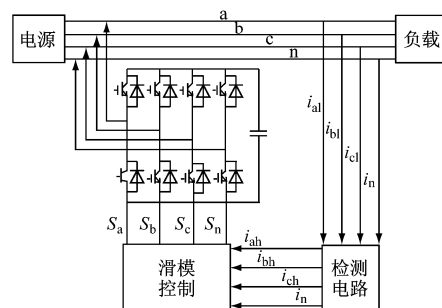


图3 基于滑模控制的 APF 的控制框图

的速率为 ε 所以只要 ε 比较小,就可以使抖动大幅度减弱。

滑模控制器的主要目的是让逆变器无差地跟踪指令信号。以 A 相为例引入误差:

$$e_a = i_a - i_a^* \quad (13)$$

滑模面设计为 $s = e_a$, 目的就是让变流器的输出电流 i_a 无差地跟踪指令信号 i_a^* , 即 $s = 0$ 。

将式(2)代入式(13)得

$$\dot{e}_a = \frac{u_{sa} - V_{DC} S_a - V_{NO} - R e_a}{L_s} - \frac{R}{L_s} i_a^* - \dot{i}_a^* \quad (14)$$

将 \dot{e}_a 代入趋近律 \dot{s} 中得

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn} e_a - k e_a = \frac{u_{sa} - V_{DC} S_a - V_{NO} - R e_a}{L_s} - \frac{R}{L_s} i_a^* - \dot{i}_a^* \quad (15)$$

所以有

$$\begin{aligned} S_a &= [(k - \frac{R}{L_s}) e_a + \varepsilon \operatorname{sgn} e_a + \frac{u_{sa}}{L_s} - \frac{V_{NO}}{L_s} - \frac{R_a}{L_s} i_a^* - \\ i_a^*] \frac{L_s}{V_{DC}} &= \varepsilon \frac{L_s}{V_{DC}} \operatorname{sgn} e_a + [(k - \frac{R}{L_s}) e_a + Q'] \frac{L_s}{V_{DC}} \end{aligned} \quad (16)$$

式中: $Q' = \frac{u_{sa}}{L_s} - \frac{V_{NO}}{L_s} - \frac{R_a}{L_s} i_a^* - \dot{i}_a^*$; $\varepsilon \frac{L_s}{V_{DC}} \operatorname{sgn} e_a$ 起

到生成滑动模态变结构的作用; $[(k - \frac{R}{L_s}) e_a + Q']$

$\frac{L_s}{V_{DC}}$ 起到消除原对象动力学作用和生成新的对象动力学的作用。

将 S_a 表示为

$$S_a = S_{eq} + k' e_a + \dot{\varepsilon} \operatorname{sgn} e_a \quad (17)$$

式中: $S_{eq} = Q' \frac{L_s}{V_{DC}} = (\frac{u_{sa}}{L_s} - \frac{V_{NO}}{L_s} - \frac{R_a}{L_s} i_a^* -$

$$i_a^*) \frac{L_s}{V_{DC}}; k' = (k - \frac{R}{L_s}) \frac{L_s}{V_{DC}}; \dot{\varepsilon} = \varepsilon \frac{L_s}{V_{DC}}。$$

同理可得

$$S_b = S_{eq} - k' e_b + \dot{\varepsilon} \operatorname{sgn} e_b \quad (18)$$

$$S_c = S_{eq} - k' e_c + \dot{\varepsilon} \operatorname{sgn} e_c \quad (19)$$

其中 S_n 稍有不同:

$$S_n = [(k - \frac{R}{L_s})e_n + \xi \operatorname{sgn} e_n - \frac{V_{NO}}{L_s} - \frac{R_a}{L_s} i_n^* - i_n^* \frac{L_s}{V_{DC}} = S'_{eq} - k' e_n + \dot{\xi} \operatorname{sgn} e_n \quad (20)$$

接下来还需要选择适当的逆变器, 使得 S_{eq} 满足 $S_{eq} \in (-1, 1)$, 然后只要选择合适的 $\dot{\xi}$ 和 k' , 就可以使 $S_a \in (-1, 1)$ 。最后利用采样控制定理, 即冲量相等而形状不同的窄脉冲加在具有惯性的环节上, 其效果基本相同, 将控制 S_a 转化为用 ± 1 电平表示的 PWM 波形即可。

3 仿真分析

在 Matlab 软件中对滑模控制策略进行仿真。采用工频 380 V 三相电源和负载三相全控桥整流器, 仿真时间为 0.1 s, 未加 APF 的 A 相电源侧电流如图 4 所示, 检测到的 A 相谐波电流如图 5 所示, 频谱分析如图 6 所示, 图 7 为中性线电流, 加入 APF 后电源侧的电流如图 8 所示。

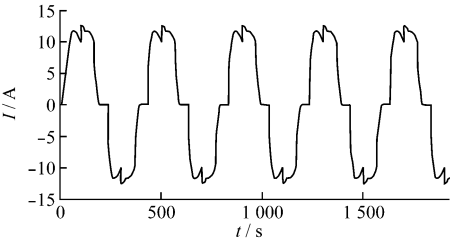


图 4 未加 APF 的 A 相电源侧电流波形

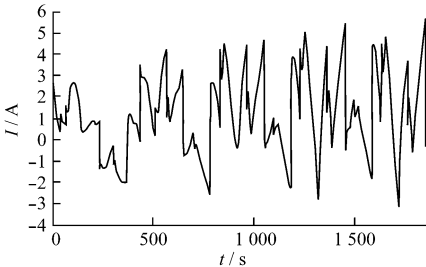


图 5 A 相电源侧谐波电流波形

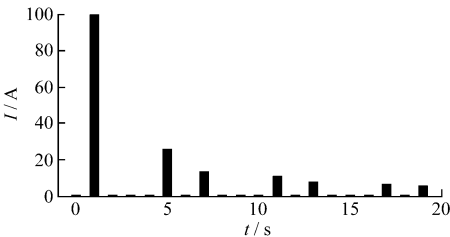


图 6 A 相电源侧有谐波电流的频谱分析

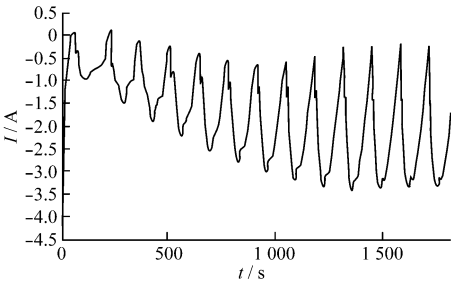


图 7 A 相电源侧中性线电流波形

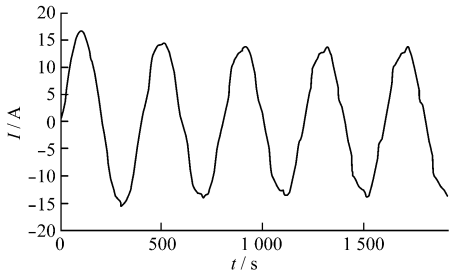


图 8 加入 APF 后的 A 相电源侧电流波形

对比图 4 与图 8 可看出, 加入所设计的 APF 后, 电源侧电流的波形有了很大改善, 这说明该基于滑模控制的三相四线制 APF 的有效性。

4 结语

采用四桥臂 PWM 逆变器作为 APF 的主电路, 并采用滑模指数趋近律设计控制策略。仿真结果表明该控制策略下的 APF 能够有效地补偿谐波电流。

参考文献:

[1] 王兆安, 杨军, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2006.

[2] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

[3] 姚琼荃, 黄继起, 吴汉松. 变结构控制系统[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1997.

[4] 杨宏, 阮新波, 严仰光, 等. 采用双环控制的四桥臂三相逆变器[C]// 第十四届全国电源技术年会论文集, 2001, 北京: 189-191.

[5] 张崇巍, 张兴. PWM 变流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

[6] 陈然, 孙逸洁. 有源滤波器的三相四线制谐波检测新方法研究[J]. 科技信息, 2008(25): 96-98.

[7] El KATEB M, ABDELKADER S, ELMITWALLY A, et al. Novel Three phase Active Filter Based on Neural Networks and Sliding Mode Control[C]// Proceedings of the Universities Power Engineering Conference, 1999, San Jose: 399-402.