

一种简单的预测电流控制新方法

郭自勇¹,周有庆¹,郭利敏²,欧阳帆¹,高 乐¹

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082;

2. 长沙威胜电子有限公司,湖南 长沙 410013)

摘要: 为提高有源电力滤波器(APF)的电流跟踪性能,提出一种简单的预测电流控制新方法。该方法在当前采样时刻预测下一采样时刻参考电流值,计算出 APF 在下一采样时刻输出端参考电压值,再利用电压空间矢量调制得出控制开关信号,以达到电流跟踪控制目的。稳态时,利用前一周期存储的参考电流历史数据预测下一采样时刻参考电流值;暂态时,利用二阶外推插值法得到下一采样时刻参考电流值。该控制方法可以消除采样、计算等带来的延时,有效降低开关频率波动范围,具有电压利用率高、开关损耗小、动态响应快的优点。仿真与实验结果证明了该方法的正确性和可行性。

关键词: 有源电力滤波器; 电流跟踪; 电压空间矢量; 预测控制

中图分类号: TN 713

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)07-0029-04

0 引言

近年来,有源电力滤波器(APF)作为治理电网谐波的新型电力电子装置,得到了快速发展^[1-3]。目前,APF 电流控制方法主要有滞环电流控制和三角波调制。前者精度较高且响应快,但开关频率可能波动很大;后者开关频率恒定,但响应较慢,精度较低。

当前,电压空间矢量调制方法在交流电机调速、PWM 整流器和逆变器等电力电子领域得到了广泛应用^[4-9]。该方法可有效降低开关频率波动范围,提高直流电压利用率;但是,该方法算法复杂,计算量大,由此导致的计算延时不可忽略,再加上采样的固有延时,对电流控制造成了一定影响。

现提出一种基于电压空间矢量的 APF 预测电

流控制新方法。该方法在 k 采样时刻预测 $k+1$ 采样时刻参考电流值,计算 $k+1$ 采样时刻 APF 参考电压值,通过电压空间矢量脉宽调制方法得出相应控制开关信号,以达到电流跟踪控制目的。电压空间矢量调制可以提高直流利用率,降低开关频率波动范围,开关损耗小;预测方法的应用则可以消除采样、计算等引起的延时对电流控制的不利影响。

1 APF 预测控制基本原理

如图1所示为 APF 原理图。图 1 中, L_s 为电源阻抗, L_i 为整流器进线电抗器, L_d 为整流器直流侧电抗, L 为 APF 交流侧滤波电抗; e_a, e_b, e_c 为电源电压; u_a, u_b, u_c 为 APF 输出相电压; i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} 为电源电流; i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc} 为负载电流; i_{ca}, i_{cb}, i_{cc} 为 APF 输出电流; U_{dc} 为直流侧电容电压; $V_{IG1} \sim V_{IG6}$ 为 IGBT, $S_1 \sim S_6$ 为 IGBT 开关控制信号。

收稿日期:2006-08-24;修回日期:2006-12-21

Splitting and islanding of networked dispersed generators

DING Lei, PAN Zhen-cun, SU Yong-zhi, CONG Wei

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: According to the principle of active power balance, proprietorship of dispersed generators and network topology, the operation concept of power distribution network in hierarchical islands of dispersed generators is presented, which makes the best use of dispersed generators to improve the reliability of power supply. A distribution network with dispersed generators can be split hierarchically into plant islands and substation islands according to load matching when fault occurs. The power imbalance within an island is calculated with the measured power flow change of tieline, and the real-time load shedding is executed with the consideration of island regulation capability. A hierarchically distributed control system is introduced, which integrates the functions of grid splitting, real-time load shedding, re-closing and re-synchronizing via high-speed communication network.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China(50477041).

Key words: dispersed generators; hierarchical islands; real-time load shedding; split

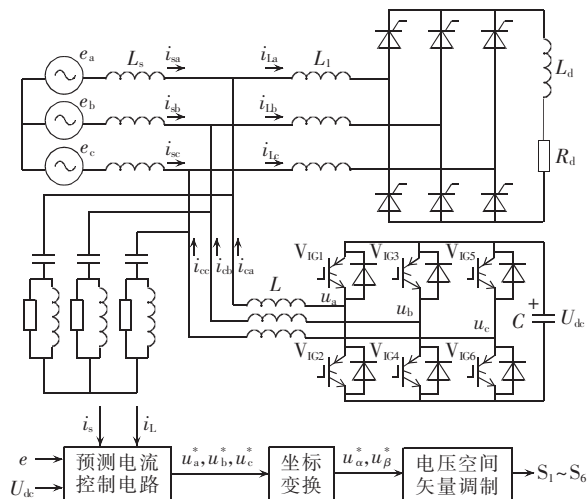


图 1 有源电力滤波器系统框图

Fig.1 Block diagram of APF system

忽略电源阻抗的影响,则有三相电路瞬时值方程:

$$u_x = L \frac{di_{cx}}{dt} + e_x, \quad x = a, b, c \quad (1)$$

式(1)离散化可得:

$$u_x^*(k+1) = L \left[\frac{i_{cx}^*(k+1) - i_{cx}(k)}{t_s} \right] + e_x(k) \quad (2)$$

式中 $i_{cx}^*(k+1)$ 和 $u_x^*(k+1)$ 分别为在 $k+1$ 采样时刻的 x 相 APF 的参考输出电流值与预测参考输出电压值; t_s 为电压矢量 u 的作用时间。

由式(2)可知,为了在 k 采样时刻得到 $k+1$ 采样时刻的 APF 参考输出电压值 $u_x^*(k+1)$,就必须提前一个采样时刻预测出 APF 参考输出电流值 $i_{cx}^*(k+1)$ 。

在提前一个采样时刻计算出 APF 参考输出电压值 $u_x^*(k+1)$ 后,使用电压空间矢量调制方法就可以得到合适的 APF 开关控制信号 $S_1 \sim S_6$,从而达到电流跟踪控制目的。

2 参考电流预测原理

如上所述,如何在当前采样时刻准确、快速地预测下一采样时刻的参考电流值对于实现 APF 预测电流控制方法非常重要。现提出一种简单有效的快速预测参考电流方法。稳态时,利用上一周期的历史数据产生当前采样时刻的参考电流值;暂态时,利用二阶外推插值法得到当前采样时刻的参考电流值。

在稳态时,负载电流及其所含有的谐波电流成分都比较稳定,可以认为负载电流是周期变化的,因此可以利用所存储的上一周期参考电流值得到下一采样时刻参考电流值,即

$$i_{cx}^*(k+1) = i_{cx}^*[k - (N-1)] \quad (3)$$

式中 N 为周期采样点数。

在暂态时,因为负载电流在变化,因此上述预测方法不再准确。此时,利用拉格朗日插值法做出外推预测,有

$$i_{cx}^*(k+1) = 3i_{cx}^*(k) - 3i_{cx}^*(k-1) + i_{cx}^*(k-2) \quad (4)$$

图 2 中,下一采样时刻参考电流信号的产生需要

根据不同情况选择不同预测方法,只需判断负载电流处于稳态还是暂态就可以确定参考电流信号的产生方法了。

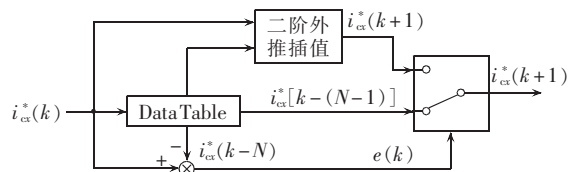


图 2 参考电流预测框图

Fig.2 Block diagram of current reference prediction

在稳态时,有

$$i_{cx}^*(k) - i_{cx}^*(k-N) \approx 0 \quad (5)$$

由于系统的不确定性(比如测量噪声),上式中左边两者不一定完全相同。因此,暂态的判断条件可以设定为

$$e(k) = i_{cx}^*(k) - i_{cx}^*(k-N) \geq e_{\max} \quad (6)$$

式(6)中, $e_{\max}$ 定义为两者的最大误差。当式(6)成立时,负载电流处于暂态,使用式(4)进行电流预测;当式(6)不成立时,负载电流处于稳态,则使用式(3)进行电流预测。

3 APF 的电压空间矢量调制

对于三相电压源逆变器而言,APF 的输出相电压 u_a, u_b, u_c 依赖于它所对应的逆变器桥臂上下功率开关的状态。电压源逆变器正常工作时有 8 种状态,根据开关的不同状态形成 8 个基本电压空间矢量 $U_0 \sim U_7$,包括 6 个有效矢量 $U_1 \sim U_6$ 和 2 个零矢量 U_0, U_7 ,将复平面分成 6 个扇区,如图 3 所示。

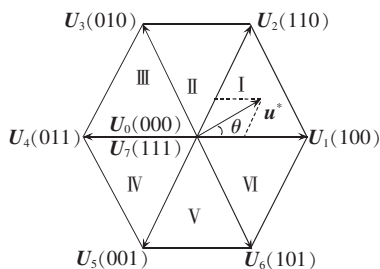


图 3 三相电压源逆变器的空间矢量

Fig.3 Space vectors of three-phase voltage-source inverter

任意 APF 的参考电压矢量 u^* 都可用其所在扇区边界的 2 个相邻的特定矢量 U_x 与 U_y 来合成,从而实现 APF 的电流跟踪控制。由平行四边形法则和 PWM 面积等效原理可求出相应的功率器件的开关作用时间为

$$t_x = \frac{\sqrt{3} |u| \sin(\pi/3 - \theta)}{U_{dc}} t_s$$

$$t_y = \frac{\sqrt{3} |u| \sin \theta}{U_{dc}} t_s \quad (7)$$

$$t_0 = t_s - t_x - t_y$$

式中 t_x, t_y 分别为电压矢量 U_x, U_y 的作用时间; t_0 为零电压矢量 U_0 的作用时间。

对于三相电压源逆变器某一给定的电压空间矢量 u^* , 常有 3 种合成方法^[10], 综合考虑算法复杂性、开关频率、开关损耗及谐波幅值, 这里选用第 2 种合成方法: 将零矢量 U_0 均匀地分布在矢量 u^* 的起、终点上, 除零矢量外, u^* 依次由 U_x, U_y, U_x 合成, 并从矢量 u^* 中点截出 2 个三角形, 如图 4 所示。

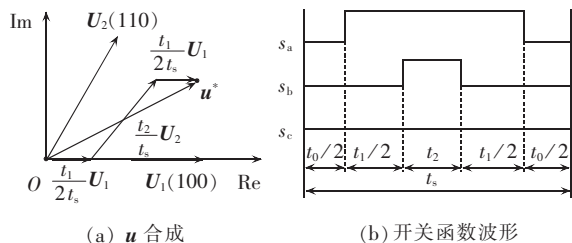


图 4 电压空间矢量图与开关信号

Fig.4 Voltage space vector diagram and switching signals

对三相电压源逆变器输出电压的约束, 可采用限制开关的导通时间来实现。如果

$$t_x + t_y > t_s \quad (8)$$

则取

$$t'_x = \frac{t_s}{t_x + t_y} t_x, \quad t'_y = \frac{t_s}{t_x + t_y} t_y \quad (9)$$

这样合成的电压矢量限定在图 3 中六边形内切圆之内的空间矢量圆轨迹中。

4 仿真与实验结果分析

4.1 仿真结果

在仿真软件 Matlab/Simulink 5.1 对提出的 APF 预测电流控制方法进行了仿真研究, 并与普通滞环电流控制算法进行了对比分析。

仿真主电路如图 1 所示, 其主要参数为: 电源线电压为 380 V, 系统阻抗忽略不计; 负载为二极管整流桥, $L_d = 3$ mH, $L_i = 0.3$ mH, $R_d = 1.5 \Omega$; 直流侧电压 $U_{dc} = 800$ V, 滤波电抗 $L = 1.5$ mH。

仿真波形见图 5(横轴 10 ms/格, 纵轴 500 A/格), 图 5(a)为负载电流波形, 图 5(b)和(c)分别为采用

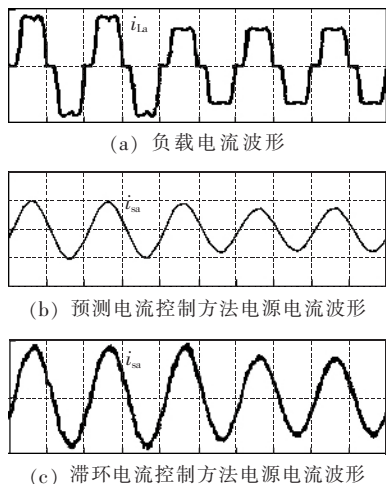


图 5 仿真波形

Fig.5 Simulation waves

预测电流控制方法与滞环电流控制方法所得电源电流波形。

由图 5 可知, 采用预测电流控制方法所得补偿后电源电流波形基本上为正弦波, 并且电流纹波非常小, 在负载突然变化时也能很好地对电流进行跟踪控制; 而采用滞环电流控制方法所得电源电流波形则电流纹波很大。经分析, 两者电源电流谐波总畸变率分别为 3.03 % 和 6.06 %。

图 6 为 2 种控制方法所得电源电流的 $\alpha\beta$ 矢量波形, 图中坐标单位每格 200 A。很明显, 图 6(a)中电源电流的 $\alpha\beta$ 矢量运动轨迹基本上是一个圆, 仅仅在扇区交界处略有不同; 而图 6(b)中的矢量运动轨迹则毛刺较大, 这是由于电源电流纹波较大所引起的。

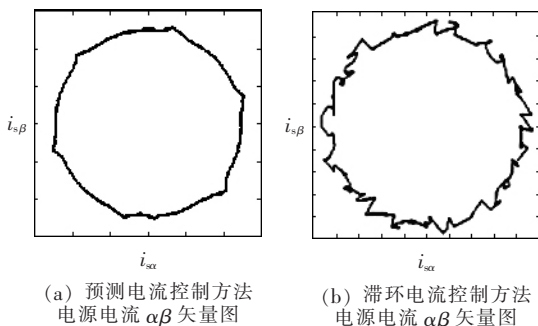


图 6 电压空间矢量运动轨迹

Fig.6 Voltage space vector trajectory

4.2 实验结果

在实验样机上对该预测电流方法进行了实验验证, 并与相同条件下滞环电流控制方法的实验结果进行了对比分析。实验样机控制单元采用 TI 公司 32 位浮点 DSP 芯片 TMS320VC33, IGBT 采用 EUPEC 公司的半桥模块 FF800R17KF6C-B2。实验条件与 4.1 节中仿真条件相同。

实验波形见图 7(横轴 5 ms/格, 纵轴 100 A/格), 图 7(a)为负载电流波形, 图 7(b)(c)分别为采用预测电流控制方法与滞环电流控制方法所得电源电流波形。

由图 7 可知, 使用预测电流控制方法比滞环电流

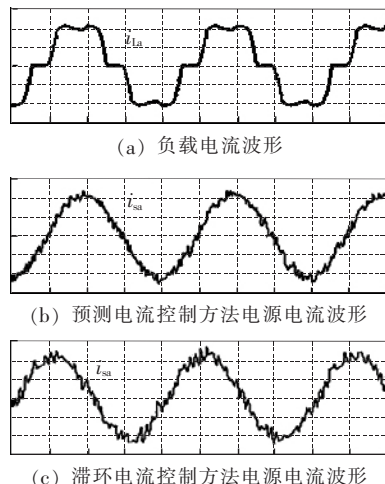


图 7 实验波形

Fig.7 Experimental waves

控制方法所得电源电流波形更光滑,纹波电流更小;经谐波畸变率分析,两者电源电流谐波总畸变率分别为 6.4% 和 8.4%。

4.3 与普通滞环电流控制的对比分析

文中的预测电流控制算法是在当前时刻预测出下一时刻的参考电压矢量,然后使用电压空间矢量调制方法得到合适的开关控制信号,实现对电流的精确跟踪。滞环电流控制方法是与此不同的一种控制方法,它是依据电流误差反馈信号是否越过滞环宽度来决定是否对 PWM 控制信号作出极性改变,这决定了其对电流误差的补偿,理论上是一种有差控制方式,这也是滞环电流控制方式下电流的高频纹波较大的主要原因。

5 结论

针对负载电流所处的暂态和稳态 2 种情况,分别给出了当前采样时刻参考电流值相应的预测方法,然后得到 APF 参考电压值,并通过电压空间矢量脉宽调制得出相应控制开关信号,以达到电流跟踪控制目的。在此基础上,分别进行了相应的仿真与实验研究,仿真与实验结果证明了该预测电流控制方法与传统电流控制方法相比,可以消除采样、计算等带来的延时,具有更好的电流补偿效果。

参考文献:

- [1] 陈国柱,吕征宇,钱照明. 有源电力滤波器的一般原理及应用[J]. 中国电机工程学报,2000,20(9):17-21.
CHEN Guo-zhu, LÜ Zheng-yu, QIAN Zhao-ming. The general principle of active power filter and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 17-21.
- [2] EI - HABROUK M, DARWISH M K, MEHTA P. Active power filter: a review[J]. IEE Proceeding - Electric Power Applications, 2000, 147(5): 403-413.
- [3] 万蕴杰,周林,张海,等. 基于数字信号处理器的有源电力滤波器控制方案综述[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 51-55.
WAN Yun-jie, ZHOU Lin, ZHANG Hai, et al. Control schemes of active power filter using digital signal processor[J]. Power System

Technology, 2005, 29(15): 51-55.

- [4] 杨贵杰,孙力,崔乃政,等. 空间矢量脉宽调制方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(5): 79-83.
YANG Gui-jie, SUN Li, CUI Nai-zheng, et al. Study on method of the space vector PWM[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(5): 79-83.
- [5] 王永,沈颂华,吕宏丽,等. 基于简单电压空间矢量三相逆变器的研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(10): 24-29.
WANG Yong, SHEN Song-hua, LÜ Hong-li, et al. Study of three-phase inverters based on simplified voltage space-vector method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(10): 24-29.
- [6] 姜俊峰,刘会金. 空间矢量控制在有源滤波器中的应用[J]. 继电器, 2004, 32(9): 27-30.
JIANG Jun-feng, LIU Hui-jin. Application of SVPWM strategy in active power filter[J]. Relay, 2004, 32(9): 27-30.
- [7] 张兴,季建强,余勇,等. 电流型 PWM 整流器低电压应力空间矢量 PWM(SVPWM)研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 144-149.
ZHANG Xing, JI Jian-qiang, YU Yong, et al. Study of low voltage stress space vector PWM control for current source PWM rectifier[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 144-149.
- [8] 毛鸿,吴兆麟. 基于三相 PWM 整流器的无死区空间矢量调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(11): 100-104.
MAO Hong, WU Zhao-lin. The non-dead-time space-vector modulation strategy based on three-phase PWM rectifiers[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(11): 100-104.
- [9] 肖岚,徐慧,胡文斌,等. 变频器的电压空间矢量调制控制技术研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(2): 73-78.
XIAO Lan, XU Hui, HU Wen-bin, et al. Research on voltage space vector modulation control technology for inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(2): 73-78.
- [10] 张崇巍,张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

郭自勇(1979-),男,湖北仙桃人,博士研究生,研究方向为电力系统谐波抑制和无功补偿、电能质量控制(E-mail:gzizyong2004@126.com);

周有庆(1944-),男,河北故城人,教授,博士生导师,研究方向为电力系统继电保护、电力系统综合自动化与新型输电技术。

Simple method of predictive current control

GUO Zi-yong¹, ZHOU You-qing¹, GUO Li-min², OUYANG Fan¹, GAO Le¹

(1. Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Changsha Weisheng Electronics Co., Ltd., Changsha 410013, China)

Abstract: In order to improve the current tracking performance of APF (Active Power Filter), a simple predictive current control method is proposed, which predicts the current reference of next sampling instant at current sampling period, calculates the voltage reference of next sampling instant for APF, and then obtains the corresponding switching signals by voltage space vector modulation to realize current tracking control. In stationary state it uses data collected in previous period to predict next current reference while in transient state it uses two-order extrapolation, which eliminates the delay caused by sampling and calculation and effectively lowers the switching frequency, with high voltage utilization factor, low switching loss and fast dynamic response. Simulation results show the proposed method is valid and feasible.

Key words: active power filter; current tracking; voltage space vector; predictive control