

12-12-2019

Control method of unified SVPWM for three-phase four-switch Fault-tolerant APF based on inductor current

Jianfeng Yang

1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
;2. Key Laboratory of Opto-Technology and Intelligent Control of Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

Jiang Hui

1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
;

Tianqi Zhou

1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Control method of unified SVPWM for three-phase four-switch Fault-tolerant APF based on inductor current

Abstract

Abstract: The algorithm of conventional space vector PWM for three-phase four-switch fault-tolerant APF chooses different coordinate transformation control algorithm based on the fault location selection of phase A, phase B, phase C. The calculation process involves a lot of coordinate operation, and is not conducive to the fault switching. *A unified SVPWM for three-phase four-switch Fault-tolerant active power filter based on inductor current is presented. The traditional SVPWM control needs complex coordinate transformations. The simplified algorithm takes the inductor current change as the control target, does not complicated coordinate transformation calculation, and the form of the calculation is unified, which is easy to the fault switching.* At the same time, the calculation of three-phase four-switch active power filter is reduced effectively, and the harmonic compensation accuracy of the three-phase four-switch APF is improved. The simulation results verify the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords

active power filter, space vector pulse width modulation, fault-tolerant control, inductor current

Recommended Citation

Yang Jianfeng, Jiang Hui, Zhou Tianqi. Control method of unified SVPWM for three-phase four-switch Fault-tolerant APF based on inductor current[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(10): 2103-2111.

基于电感电流的容错 APF 统一 SVPWM 控制方法

杨剑锋^{1,2}, 江辉¹, 周天奇¹

(1. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 兰州交通大学 光电技术与智能控制教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 传统容错三相四开关 SVPWM 控制方法要根据 A 相、B 相、C 相的故障位置选择不同坐标变换的控制算法, 该计算过程涉及大量的坐标运算, 不利于容错控制的切换。基于电感电流提出一种容错三相四开关 APF 统一 SVPWM 控制方法, 与传统 SVPWM 控制方法通过坐标变化计算参考电压矢量不同, 该方法以电感电流变化量为控制目标, 无需复杂的坐标变换计算, 计算表达式形式统一, 利于系统容错算法的切换, 同时能有效减少容错三相四开关有源滤波器控制电路计算量, 提高谐波补偿精度, 仿真结果验证了该算法的有效性。

关键词: 有源电力滤波器; 空间矢量脉宽调制; 容错控制; 电感电流

中图分类号: TM71

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2019) 10-2103-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0429

Control method of unified SVPWM for three-phase four-switch Fault-tolerant APF based on inductor current

Yang Jianfeng^{1,2}, Jiang Hui¹, Zhou Tianqi¹

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Key Laboratory of Opto-Technology and Intelligent Control of Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The algorithm of conventional space vector PWM for three-phase four-switch fault-tolerant APF chooses different coordinate transformation control algorithm based on the fault location selection of phase A, phase B, phase C. The calculation process involves a lot of coordinate operation, and is not conducive to the fault switching. A unified SVPWM for three-phase four-switch Fault-tolerant active power filter based on inductor current is presented. The traditional SVPWM control needs complex coordinate transformations. The simplified algorithm takes the inductor current change as the control target, does not complicated coordinate transformation calculation, and the form of the calculation is unified, which is easy to the fault switching. At the same time, the calculation of three-phase four-switch active power filter is reduced effectively, and the harmonic compensation accuracy of the three-phase four-switch APF is improved. The simulation results verify the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: active power filter; space vector pulse width modulation; fault-tolerant control; inductor current

引言

随着电子设备使用的快速增长, 由其产生的电

能质量问题日渐严重, 有源电力滤波器(active power filter, APF)因具有谐波补偿性能高、响应速度快等优势而受到越来越多的关注和研究^[1]。

IGBT 是构成 APF 的重要开关元器件, 需要持续在高温、高频条件下运行, 因而故障率较高, 而一旦 IGBT 出现故障, APF 将无法继续稳定运行, 研究容错 APF 一方面可提高系统的容错性



收稿日期: 2017-09-11 修回日期: 2017-11-03;
基金项目: 国家自然科学基金(61863023);
作者简介: 杨剑锋(1980-), 男, 河南浉池, 博士, 副教授, 研究方向为先进电气控制技术; 江辉(1991-), 男, 江苏无锡, 硕士生, 研究方向为谐波治理与检测。

<http://www.china-simulation.com>

• 2103 •

能, 当有源滤波器发生故障后经容错控制而使系统继续稳定运行^[2-5], 另一方面容错 APF 仅有两相桥臂, 实际应用中能够显著降低制造成本, 同时整机功耗相对于六开关系统有了明显下降^[6]。文献[7]对故障容错型三相四开关 APF 的电路拓扑进行了分析, 采用三角波比较方式对电流进行控制。而同三角波比较的控制方法相比, 空间矢量控制(space vector pulse with modulation, SVPWM)因其易于编程实现而在实际中使用的越来越多。文献[8]阐明了有源电力滤波器的故障原理, 同时分别推导出了 A 相故障、B 相故障、C 相故障的三相四开关有源滤波器 SVPWM 控制方法。但是该方法涉及大量的反三角函数和无理数运算, 较难满足计算的实时性和精度。文献[9]提出一种改进型 SVPWM 算法, 通过采用新型坐标变换使得计算量减少, 同时提高了控制精度, 但只是对 C 相故障的容错 APF 进行了讨论, 对于其它两相的坐标变换形式又不尽相同, 在故障切换时依然有大量的复杂坐标变换需要计算, 不利于容错控制的切换。文献[10]提出了一种基于电感电流的无功补偿控制方法, 该控制方法无需复杂的坐标变换运算, 只需简单的线性四则运算即可实现对逆变器输出电流的精确控制, 但该方法对系统参数的依赖性大, 实际应用中需实时辨识系统参数的变化, 对系统硬件设计提出了较高要求。

本文首先对容错型三相四开关 APF 的 SVPWM 控制方法进行了分析, 推导出各相故障时容错三相四开关 APF 空间矢量控制公式, 针对各相容错 SVPWM 控制算法坐标变换互不相同, 计算过程复杂, 提出一种基于电感电流的统一容错三相四开关 SVPWM 控制方法。首先推导出各相故障后统一 SVPWM 控制表达式, 其次求解出基于电感电流的各基本电压矢量作用时间的计算方法, 最后给出了基本电压矢量矩阵表。仿真结果说明当 APF 任意一相出现故障时, 所提方法均能继续有效补偿谐波, 具有系统切换方便, 易于实现等特点。

1 三相四开关 APF 的 SVPWM 分析

图 1 为 APF 的拓扑结构, 当检测到有一相出现短路或者开关器件故障时, 快速熔断器将对故障桥臂隔离, 同时使对应相的双向可控硅开关导通, 将故障相的输出与 o 点直接相连, 使 APF 从六开关切换至四开关, 从而使系统在三相四开关状态下继续运行。如 A 相桥臂出现故障时, 开关 T_a 导通, T_b 、 T_c 继续保持关断状态, 此时电路切换至图 2 所示。

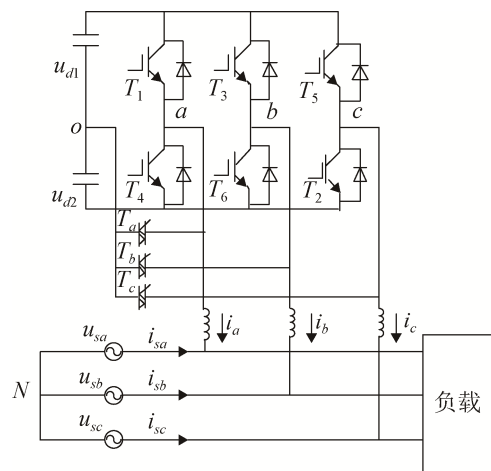


图 1 三相四开关容错型有源滤波器拓扑图
Fig. 1 Fault-tolerant topology APF of 3-phase 4-switch

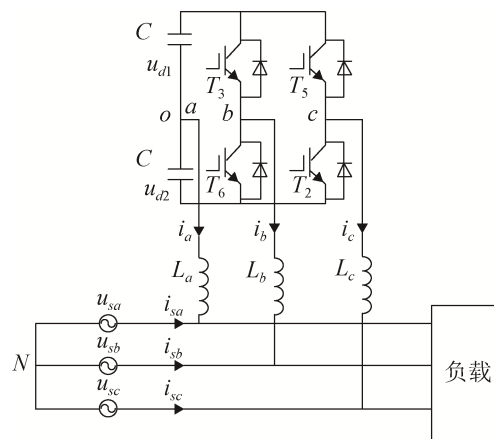


图 2 A 相故障容错结构
Fig. 2 Fault-tolerant topology with A phase fault

由于逆变器输出三相电流之和始终为零, 容错的实质是只要控制其中的两相电流, 另一相(故障相)的电流自然受控。以有源滤波器 A 相故障为例,

三相四开关 APF 输出相电压与开关状态的关系式为^[11]

$$\begin{bmatrix} u_{aN} \\ u_{bN} \\ u_{cN} \end{bmatrix} = U_{dc} \begin{bmatrix} -\frac{1}{6}S_b - \frac{1}{6}S_c \\ \frac{1}{3}S_b - \frac{1}{6}S_c \\ -\frac{1}{6}S_b + \frac{1}{3}S_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $u_{xN}(x=a,b,c)$ 为系统侧 N 点与容错 APF 交流侧 a 、 b 和 c 之间的电压差; S_b 、 S_c 分别为 B、C 两相的开关信号(‘1’表示该相桥臂上开关闭合、下开关断开; ‘-1’表示该相桥臂上开关断开、下开关闭合); U_{dc} 为直流侧电容总电压。由图 2, 并结合 KCL 可得

$$\begin{bmatrix} u_{aN} \\ u_{bN} \\ u_{cN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{oN} \\ u_{bo} + u_{oN} \\ u_{co} + u_{oN} \end{bmatrix} \quad (2)$$

考虑到系统三相平衡, 因而有

$$u_{aN} + u_{bN} + u_{cN} = 0 \quad (3)$$

结合式(2)~(3)可得

$$\begin{bmatrix} u_{aN} \\ u_{bN} \\ u_{cN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{U_{dc}}{6}S_b - \frac{U_{dc}}{6}S_c \\ \frac{U_{dc}}{3}S_b - \frac{U_{dc}}{6}S_c \\ -\frac{U_{dc}}{6}S_b + \frac{U_{dc}}{3}S_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

将式(4)变换到 $\alpha\beta$ 静止坐标系下, 即

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix} = C_{3/2} \begin{bmatrix} u_{aN} \\ u_{bN} \\ u_{cN} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\text{式中: } C_{3/2} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

由式(4)~(6)可得

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} -\frac{U_{dc}}{4}S_b - \frac{U_{dc}}{4}S_c \\ \frac{\sqrt{3}U_{dc}}{4}S_b - \frac{\sqrt{3}U_{dc}}{4}S_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

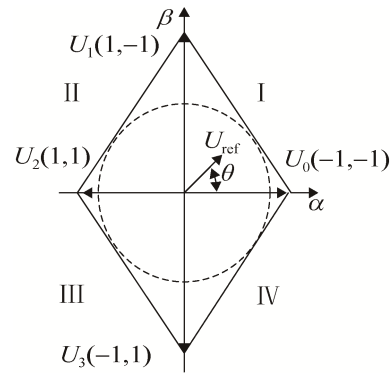
则根据(7)式, 可得 $\alpha\beta$ 坐标系下开关模式与电压空间矢量之间的数量关系, 见表 1。

表 1 B、C 相开关信号与电压空间矢量的关系
Tab. 1 Relationship between voltage vectors and switch signals of phase B and C

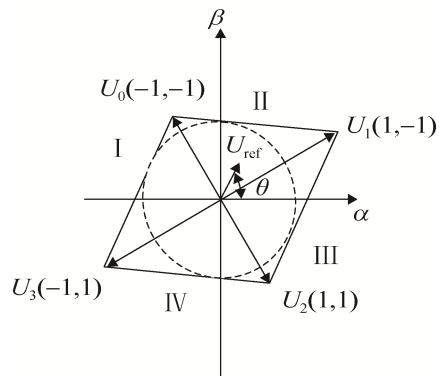
模式	S_b	S_c	$U_k = U_{\alpha} + jU_{\beta}$
1	-1	-1	$U_0 = \frac{U_{dc}}{\sqrt{6}}$
2	1	-1	$U_1 = j\frac{U_{dc}}{\sqrt{2}}$
3	1	1	$U_2 = -\frac{U_{dc}}{\sqrt{6}}$
4	-1	1	$U_3 = j\left(-\frac{U_{dc}}{\sqrt{2}}\right)$

根据表 1 可得对应的电压空间矢量图, 见图 3(a)所示。

同理可得 B 相、C 相发生故障时对应的电压空间矢量图, 如图 3(b)、(c)所示。其中 θ 为 U_{ref} 中与 α 之间的夹角。



(a) A 相故障



(b) B 相故障

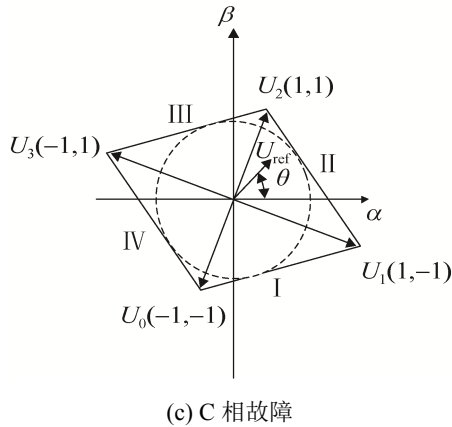


图 3 3 种三相四开关空间电压矢量划分图

Fig. 3 3 kinds of four-switch three-phase voltage space vector

从图 3 中可以看出,在求解参考电压矢量扇区和基本电压矢量作用时间之前需要计算参考电压矢量相位角 θ 及其幅值,而 A 相、B 相、C 相故障后的基本电压空间矢量与 $\alpha\beta$ 坐标系的坐标轴夹角不一致,需要选择不同的反三角函数进行运算,同时存在较多的逻辑判断,不利于控制系统容错算法的切换。

2 基于电感电流的统一 SVPWM 控制

本文所提容错三相四开关 APF 的统一 SVPWM 控制是基于电感电流的分割与整合 (Division-Summation) 思想^[12]。首先推导出有源滤波器基于电感电流的容错 A 相、B 相、C 相的统一表达式,其次将一个 SVPWM 调制周期按照基本电压矢量作用的不同分为 3 个时间段,分别分析各个时间段电压矢量与电感电流变化量的关系,最后对一个调制周期内各个电感电流变化量进行求和,从而得到各个基本电压矢量的作用时间。

以 A 相出现故障的有源滤波器为例(如图 2 所示),由基尔霍夫电压定律可得

$$\begin{cases} u_{aN} = L_a \frac{di_a}{dt} + u_{sa} \\ u_{bN} = L_b \frac{di_b}{dt} + u_{sb} \\ u_{cN} = L_c \frac{di_c}{dt} + u_{sc} \end{cases} \quad (8)$$

考虑

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (9)$$

结合式(8)~(9),可得

$$\begin{cases} u_{ab} = L_a \frac{di_a}{dt} - L_b \frac{di_b}{dt} + u_{sab} \\ u_{bc} = L_c \frac{di_c}{dt} + (L_b + L_c) \frac{di_b}{dt} + u_{sbc} \end{cases} \quad (10)$$

其中 $u_{ab} = u_{aN} - u_{bN}$ 、 $u_{bc} = u_{bN} - u_{cN}$ 、

$u_{sab} = u_{sa} - u_{sb}$ 、 $u_{sbc} = u_{sb} - u_{sc}$ 。式(10)的矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} u_{ab} \\ u_{bc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & -L_b \\ L_c & L_b + L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{sab} \\ u_{sbc} \end{bmatrix} \quad (11)$$

以电感电流为研究对象,则有

$$\begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & -L_b \\ L_c & L_b + L_c \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_{ab} \\ u_{bc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_a & -L_b \\ L_c & L_b + L_c \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_{sab} \\ u_{sbc} \end{bmatrix} \quad (12)$$

SVPWM 调制是根据伏秒特性控制逆变器开关使其产生的电压矢量逼近参考电压矢量。当参考电压矢量位于某一扇区时,需要对应的两个非零矢量 V_x 、 V_y 以及等效零矢量 V_0 进行合成,为了保证调制的平滑性,通常选择 2 个模最短电压矢量 U_0 和 U_1 组成等效零矢量。结合式(12)考虑在一个调制周期内电压矢量 V_0 、 V_x 、 V_y 作用时间分别为 T_0 、 T_x 、 T_y , 对应与电感电流变化量有以下关系式

等效零矢量作用时间 T_0 :

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{a,0} \\ \Delta i_{b,0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & -L_b \\ L_c & L_b + L_c \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_{ab,0} \\ u_{bc,0} \end{bmatrix} T_0 - \begin{bmatrix} L_a & -L_b \\ L_c & L_b + L_c \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_{sab} \\ u_{sbc} \end{bmatrix} T_0 \quad (13)$$

矢量 V_x 作用时间 T_x :

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{a,x} \\ \Delta i_{b,x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & -L_b \\ L_c & L_b + L_c \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_{ab,x} \\ u_{bc,x} \end{bmatrix} T_x - \begin{bmatrix} L_a & -L_b \\ L_c & L_b + L_c \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_{sab} \\ u_{sbc} \end{bmatrix} T_x \quad (14)$$

矢量 V_y 作用时间 T_y :

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{a,y} \\ \Delta i_{b,y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & -L_b \\ L_c & L_b + L_c \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_{ab,y} \\ u_{bc,y} \end{bmatrix}$$

$$T_y - \begin{bmatrix} L_a & -L_b \\ L_c & L_b + L_c \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_{sab} \\ u_{sbc} \end{bmatrix} T_y \quad (15)$$

考虑一个开关周期内电感电流变化量可通过计算得到, 将式(13)~(15)叠加, 可得式(16)

$$\begin{bmatrix} \Delta i_a \\ \Delta i_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & -L_b \\ L_c & L_b + L_c \end{bmatrix}^{-1} \left(\begin{bmatrix} u_{ab,0} & u_{ab,x} & u_{ab,y} \\ u_{bc,0} & u_{bc,x} & u_{bc,y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_0 \\ T_x \\ T_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{sab} \\ u_{sbc} \end{bmatrix} T_s \right) \quad (16)$$

式(16)为有源滤波器基于电感电流的容错 A 相、B 相、C 相的统一 SVPWM 控制表达式, 考虑参考电压矢量位于 4 个不同扇区时, 可将零矢量作用时间 T_0 折算到 T_x 或 T_y , 根据 A 相故障容错三相四开关 APF 各扇区电压矢量参数表(如表 2 所示), 可以得出式(17)~(20)。

扇区 I :

$$\begin{bmatrix} \Delta i_a \\ \Delta i_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & -L_b \\ L_c & L_b + L_c \end{bmatrix}^{-1} \left(\begin{bmatrix} -\frac{U_{dc}}{2} & \frac{U_{dc}}{2} & -\frac{U_{dc}}{2} \\ 0 & 0 & U_{dc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{T_0}{2} \\ T_x + \frac{T_0}{2} \\ T_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{sab} \\ u_{sbc} \end{bmatrix} T_s \right) \quad (17)$$

扇区 II :

$$\begin{bmatrix} \Delta i_a \\ \Delta i_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & -L_b \\ L_c & L_b + L_c \end{bmatrix}^{-1} \left(\begin{bmatrix} \frac{U_{dc}}{2} & -\frac{U_{dc}}{2} & -\frac{U_{dc}}{2} \\ 0 & 0 & U_{dc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{T_0}{2} \\ T_x + \frac{T_0}{2} \\ T_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{sab} \\ u_{sbc} \end{bmatrix} T_s \right) \quad (18)$$

扇区 III:

$$\begin{bmatrix} \Delta i_a \\ \Delta i_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & -L_b \\ L_c & L_b + L_c \end{bmatrix}^{-1} \left(\begin{bmatrix} \frac{U_{dc}}{2} & -\frac{U_{dc}}{2} & \frac{U_{dc}}{2} \\ 0 & 0 & -U_{dc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{T_0}{2} \\ T_x + \frac{T_0}{2} \\ T_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{sab} \\ u_{sbc} \end{bmatrix} T_s \right) \quad (19)$$

扇区 IV :

$$\begin{bmatrix} \Delta i_a \\ \Delta i_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & -L_b \\ L_c & L_b + L_c \end{bmatrix}^{-1} \left(\begin{bmatrix} -\frac{U_{dc}}{2} & \frac{U_{dc}}{2} & \frac{U_{dc}}{2} \\ 0 & 0 & -U_{dc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{T_0}{2} \\ T_x + \frac{T_0}{2} \\ T_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{sab} \\ u_{sbc} \end{bmatrix} T_s \right) \quad (20)$$

由(17)~(20)结合式(21)即可求解出各扇区对应的 T_0 、 T_x 、 T_y 。

$$T_s = T_0 + T_x + T_y \quad (21)$$

对于 A 相故障、B 相故障、C 相故障容错三相四开关 APF 而言, 控制表达式(16)的区别在于其中的系数矩阵 T 不同, 因此只需求解对应矩阵 T 的值即可实现相应故障相的容错控制。

$$T = \begin{bmatrix} u_{ab,0} & u_{ab,x} & u_{ab,y} \\ u_{bc,0} & u_{bc,x} & u_{bc,y} \end{bmatrix} \quad (22)$$

对应 A 相故障、B 相故障、C 相故障容错三相四开关 APF 容错控制的系数矩阵 T 可根据相应故障相的各扇区电压矢量参数表求取, 如表 2~4 所示。

表 2 A 相故障容错三相四开关 APF 各扇区电压矢量参数表
Tab. 2 Voltage vector parameters of phase A fault-tolerant three-phase four-switch APF for each sector

扇区	V_x	V_y	$u_{ab,x}$	$u_{bc,x}$	$u_{ab,y}$	$u_{bc,y}$
I	V_0	V_1	$\frac{U_{dc}}{2}$	0	$-\frac{U_{dc}}{2}$	U_{dc}
II	V_1	V_2	$-\frac{U_{dc}}{2}$	U_{dc}	$-\frac{U_{dc}}{2}$	0
III	V_2	V_3	$-\frac{U_{dc}}{2}$	0	$\frac{U_{dc}}{2}$	$-U_{dc}$
IV	V_3	V_0	$\frac{U_{dc}}{2}$	$-U_{dc}$	$\frac{U_{dc}}{2}$	0

表 3 B 相故障容错三相四开关 APF 各扇区电压矢量参数表
Tab. 3 Parameters of voltage vector for each sector of phase B fault-tolerant three-phase four-switch APF

扇区	V_x	V_y	$u_{ab,x}$	$u_{bc,x}$	$u_{ab,y}$	$u_{bc,y}$
I	V_0	V_1	$-\frac{U_{dc}}{2}$	$\frac{U_{dc}}{2}$	$\frac{U_{dc}}{2}$	$\frac{U_{dc}}{2}$
II	V_1	V_2	$\frac{U_{dc}}{2}$	$\frac{U_{dc}}{2}$	$\frac{U_{dc}}{2}$	$-\frac{U_{dc}}{2}$
III	V_2	V_3	$\frac{U_{dc}}{2}$	$-\frac{U_{dc}}{2}$	$-\frac{U_{dc}}{2}$	$-\frac{U_{dc}}{2}$
IV	V_3	V_0	$-\frac{U_{dc}}{2}$	$-\frac{U_{dc}}{2}$	$-\frac{U_{dc}}{2}$	$\frac{U_{dc}}{2}$

表 4 C 相故障容错三相四开关 APF 各扇区电压矢量参数表
Tab. 4 Parameters of voltage vector for each sector of phase C fault tolerant three phase four switch APF

扇区	V_x	V_y	$u_{ab,x}$	$u_{bc,x}$	$u_{ab,y}$	$u_{bc,y}$
I	V_0	V_1	0	$-\frac{U_{dc}}{2}$	U_{dc}	$-\frac{U_{dc}}{2}$
II	V_1	V_2	U_{dc}	$-\frac{U_{dc}}{2}$	0	$\frac{U_{dc}}{2}$
III	V_2	V_3	0	$\frac{U_{dc}}{2}$	$-U_{dc}$	$\frac{U_{dc}}{2}$
IV	V_3	V_0	$-U_{dc}$	$\frac{U_{dc}}{2}$	0	$-\frac{U_{dc}}{2}$

根据扇区与电网电压关系可得扇区判断条

件, 如表 5 所示。

表 5 扇区与电网电压关系
Tab. 5 Relationship between sector and grid voltage

扇区	判断条件
I	$u_{sa} > 0, u_{sc} > u_{sb}$
II	$u_{sa} > 0, u_{sb} > u_{sc}$
III	$u_{sa} < 0, u_{sb} > u_{sc}$
IV	$u_{sa} < 0, u_{sc} > u_{sb}$

图 4 为基于电感电流的容错有源滤波器空间矢量控制结构图。

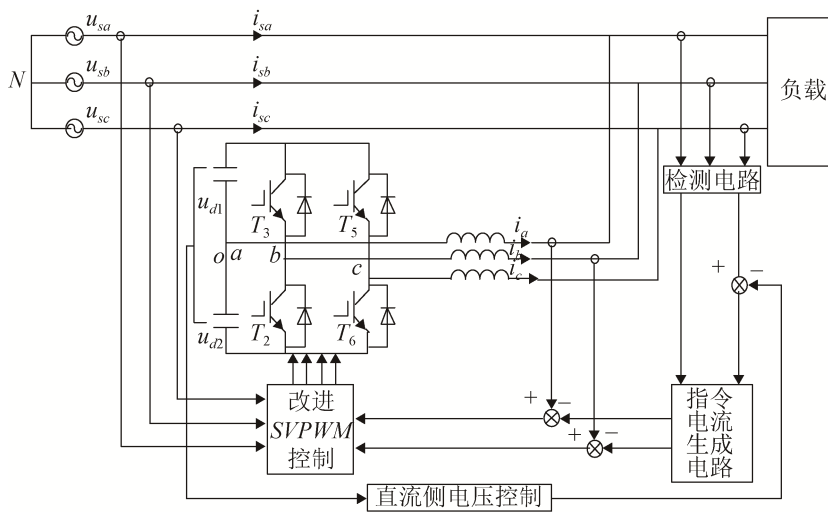


图 4 基于电感电流的容错 APF 空间矢量控制结构图

Fig. 4 Control structure of SVPWM for fault-tolerant APF based on inductor current

3 系统仿真分析

在 MATLAB/Simulink 环境下搭建仿真实验平台, 仿真参数为: 系统电源线电压为 220 V, 频率为 50 Hz, 非线性负载选用三相整流桥阻感负载, $R_1=6 \Omega$, $L_1=2 \text{ mH}$; 逆变器直流侧电容总电压设定为 $U_{dc}=1100 \text{ V}$, 采用 IGBT 为开关元器件, 开关频率为 10 kHz. 主电路参数中输出电抗器的设计一方面要满足输出电流跟踪上指令电流的最大变化率, 同时输出电流的纹波幅值应控制在规定范围内, 满足^[13]

$$\frac{(6E_m - U_{dc})T_s}{12\Delta i_{\max}} \leq L \leq \frac{U_{dc}}{2I_m\omega} \quad (23)$$

式中: U_{dc} 为直流侧总电压; E_m 为系统电源相电压

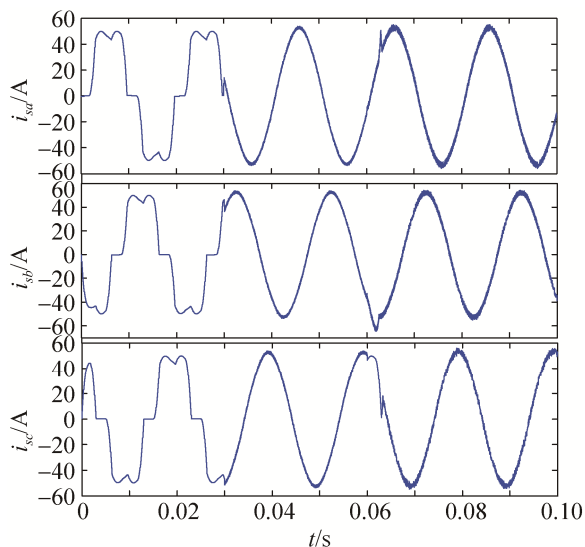
峰值; I_m 为交流侧基波相电流峰值; Δi_{\max} 为最大允许谐波电流脉动量, 由式(23)选择电抗器值 L 为 2 mH.

对直流侧电容值设计应当满足

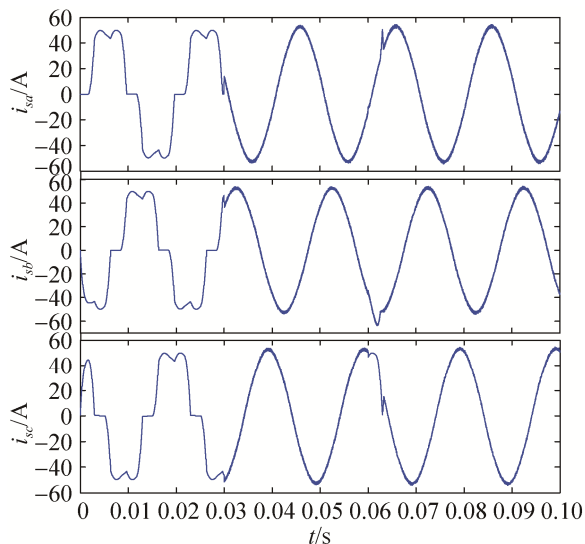
$$C = \frac{S_c T_s}{k(1+k)U_{dc}^2} \quad (24)$$

式中: S_c 为 APF 的补偿容量; k 为直流侧电压波动率. 由式(24)计算出直流侧电容值 C 为 10 000 μF .

以有源滤波器在 $t=0.03 \text{ s}$ 时投入电网, 并且 C 相在 $t=0.06 \text{ s}$ 出现故障为例, 图 5(a)是基于坐标变换控制方法^[8]的三相电流滤波效果波形, 图 5(b)是基于电感电流控制的三相电流滤波效果波形。



(a) 基于坐标变换控制的电网三相电流仿真波形



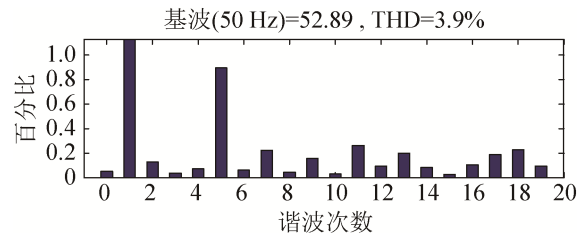
(b) 基于电感电流控制的电网三相电流仿真波形

图 5 容错有源滤波器滤波效果波形

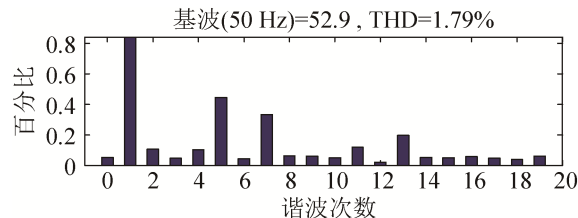
Fig. 5 Filtering waveform of fault-tolerant APF

对故障后的电网电流进行 FFT 分析, 如图 6 所示, 基于坐标变换控制方法的电网电流谐波含量从故障前的 1.66% 升高到 3.9%, 而基于电感电流控制方法的电网电流谐波含量从故障前的 1.66% 升高到 1.79%, 由图 5~6 可知, 基于电感电流的控制方法有更好的谐波抑制效果。

为进一步对容错有源滤波器补偿电流的分析, 如图 7(a) 和 7(b) 为容错有源滤波器分别采用基于坐标变换控制方法和基于电感电流控制方法在 0.07~0.09 s 内输出电流波形图。



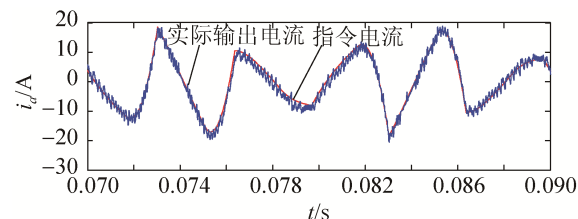
(a) 故障后 b 相电网电流 FFT 分析(基于坐标变换控制方法)



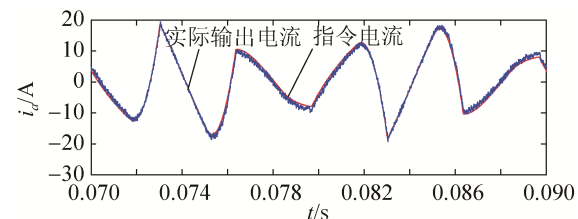
(b) 故障后 b 相电网电流 FFT 分析(基于电感电流控制方法)

图 6 故障后 b 相电网电流 FFT 分析图

Fig. 6 Fast Fourier Transformation chart of phase-b source current after fault



(a) 容错有源滤波器 b 相输出电流(基于坐标变换控制方法)



(b) 容错有源滤波器 b 相输出电流(基于电感电流控制方法)

图 7 容错有源滤波器 b 相输出电流

Fig. 7 Phase-b output current of fault-tolerant Active power filter

从图 7 可以看出基于电感电流的控制方法能够使补偿电流更好的跟踪指令电流, 在容错控制切换过程中, 补偿电流波形始终与指令电流重合。仿真结果表明所提改进控制策略的动态适应能力良好, 且动态响应速度快, 跟踪补偿效果良好。

图 8 和图 9 分别为 A 相故障和 B 相故障时采用基于电感电流的三相四开关有源滤波器 SVPWM 控制方法的电网电流仿真波形, 对 A 相

故障和 B 相故障后的电网电流分别进行 FFT 分析, 电网电流谐波含量从故障前的 1.66% 分别升高到 1.76% 和 1.73%, 可以看出所提 SVPWM 控制方法均能够保证 APF 在故障状态下继续稳定工作, 同时网侧谐波电流得到了较好的抑制。

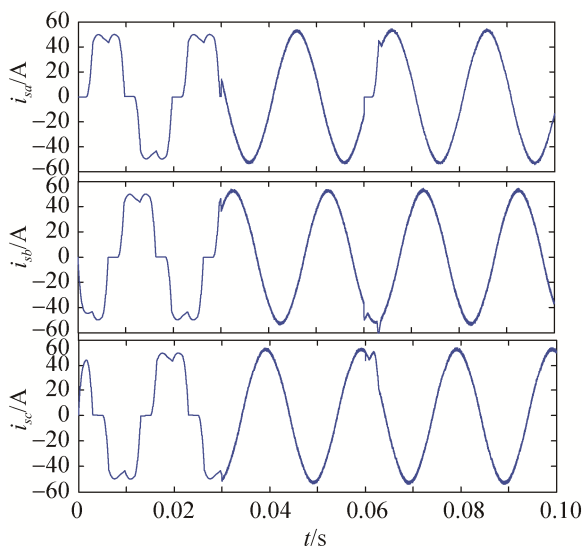


图 8 系统侧电流波形(容错有源滤波器 A 相故障)

Fig. 8 Current waveforms of the system(fault-tolerant APF in fault state of phase A)

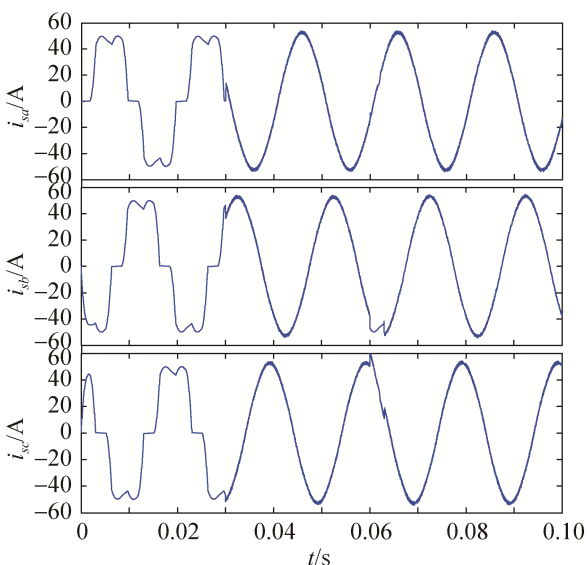


图 9 系统侧电流波形(容错有源滤波器 B 相故障)

Fig. 9 Current waveforms of the system(fault-tolerant APF in fault state of phase B)

4 结论

本文针对传统容错三相四开关 SVPWM 控制

过程复杂, 提出了一种基于电感电流的容错三相四开关 APF 统一 SVPWM 控制方法, 并对其进行了分析与研究。

(1) 所提方法计算参考电压矢量时无需坐标变换, 各桥臂开关动作时刻可根据开关周期内电感电流总变化量求解, 计算过程得到简化。

(2) 对于 A 相故障、B 相故障、C 相故障容错三相四开关 APF 而言, 所提算法控制表达式形式统一, 区别在于其中的系数矩阵 T 不同, 利于系统容错算法的切换。

(3) 与基于坐标变换的 SVPWM 控制方法相比, 该方法能大大提高容错 APF 的稳态精度, 同时整定参数少, 便于 DSP 数字化编程, 仿真结果证实了所提控制策略是有效可行的。

参考文献:

- [1] 王允建, 刘晓云, 张荣志, 等. 混合有源电力滤波器的状态反馈控制[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(6): 1284-1289.
Wang Yunjian, Liu Xiaoyun, Zhang Rongzhi, et al. State Feedback Control of Hybrid Active Power Filter[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(6): 1284-1289.
- [2] 周末, 王果, 常文寰, 等. 适于电气化铁路的三相两臂混合有源补偿研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 100-104.
Zhou Mo, Wang Guo, Chang Wenhuan, et al. Study on hybrid active compensation based on three-phase two-leg inverter for electrification railway[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 100-104.
- [3] 汪玉凤, 孟庆达, 刘涛. 有源滤波器故障诊断与容错控制改进策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 145-150.
Wang Yufeng, Meng Qingda, Liu Tao. Research of improved strategy for active power filter fault diagnosis and fault tolerant control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 145-150.
- [4] Trinh Q N, Lee H H. An advanced current control strategy for three-phase shunt active power filters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S0278-0046), 2013, 60(12): 5400-5410.
- [5] 李国华, 汪玉凤, 高小朋, 等. 基于滞环 SVPWM 的有源电力滤波器故障容错方法[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1317-1321.
Li Guohua, Wang Yufeng, Gao Xiaopeng, et al. A

- fault-tolerance method for hysteresis SVPWM based active power filter[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1317-1321.
- [6] 彭劲杰, 樊晓平, 李刚, 等. 容错并联型有源电力滤波器[J]. 信息与控制, 2013, 42(8): 547-552.
Peng Jinjie, Fan Xiaoping, Li Gang, et al. Fault-tolerant paralleling active power filter[J]. Information and Control, 2013, 42(8): 547-552.
- [7] Haddad K, Joos G. Three phase active filter topology based on a reduced switch count voltage source inverter[J]. IEEE Power Electronics Specialists Conference (S0275-9306), 1999, 1(1): 236-241.
- [8] 董伟杰, 白晓民, 朱宁辉, 等. 电力有源滤波器故障诊断与容错控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 65-72.
Dong Weijie, Bai Xiaomin, Zhu Ninghui, et al. Research on fault diagnosis and fault tolerant control of active power filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(18): 65-72.
- [9] 王文, 罗安, 黎燕, 等. 一种新型有源电力滤波器的 SVPWM 算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(18): 52-58.
Wang Wen, Luo An, Li Yan, et al. A novel algorithm of SVPWM applied to active power filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(18): 52-58.
- [10] Wu T F, Hsieh H C, Chang C H, et al. Improvement of control law derivation and region selection for D- Σ digital control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S0278-0046), 2015, 60(12): 6042-6050.
- [11] 谭兴国, 王辉, 张黎, 等. 容错型三相四开关有源电力滤波器及其控制策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 28(18): 99-104.
Tan Xingguo, Wang Hui, Zhang Li, et al. Fault-tolerant active power filter based on three-phase four-switch topology and its control strategy[J]. Automation of Electric Power System, 2014, 28(18): 99-104.
- [12] Wu T F, Hsieh H C, Hsu C W, et al. Three-Phase three-Wire active power filter with D- Σ_1 digital control to accommodate filter-inductance variation[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics (S2168-6777), 2016, 4(1): 44-53.
- [13] 刘宏超, 彭建春. 三相四开关并联型有源电力滤波器的指令电流确定方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(16): 108-113.
Liu Hongchao, Peng Jianchun. Study on current command signal of three-phase four-switch shunt active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 108-113.