

有源电力滤波器相电流互感器容错控制

刘建华, 朱蓓蓓, 张亚健, 孙富华

(中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 为了实现有源电力滤波器(APF)在交流侧电流互感器故障状态下的可靠运行, 提出一种基于相电流重构的交流侧电流互感器容错控制策略。通过分析相电流重构应用在滞环 SVPWM 控制中的不足, 提出在相电流重构中设计状态观测器。构建有源电力滤波器的电流闭环观测模型, 用观测出的电流值来对存在缺失的重构电流进行修正, 解决了相电流重构技术运用在滞环 SVPWM 控制中重构电流不完全的问题, 实现了 APF 系统的带故障运行。在 Matlab/Simulink 中进行仿真验证, 并在实验样机中进行实验, 结果均证明了该容错策略的正确性和可行性。

关键词: 有源电力滤波器; 电流滞环; 相电流重构; 容错控制; 状态观测

Fault-tolerant control of phase current transformer for active power filter

LIU Jianhua, ZHU Beibei, ZHANG Yajian, SUN Fuhua

(School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: In order to achieve the reliable operation of active power filter (APF) in the AC side current transformer fault state, a fault-tolerant control strategy based on the phase current reconstruction of AC side current transformer is proposed. By analyzing the deficiencies of phase current reconstruction based on hysteresis SVPWM control, the strategy of designing state observer in phase current reconstruction is proposed. This paper constructs the current closed-loop observation model of active power filter, and uses the observed current value to revise the missing reconstruction current to solve the problem of current reconstruction incompleteness in the phase current reconstruction techniques under hysteresis SVPWM control. Finally, the operation of the APF system under fault condition is realized. The results by both Matlab/Simulink and experiments in the experimental prototype demonstrate the correctness and feasibility of the method.

This work is supported by Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20130187).

Key words: active power filter; current hysteresis; phase current reconstruction; fault tolerant control; state observer

中图分类号: TM464 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)20-0090-07

0 引言

近年来, 随着电力电子技术的不断发展, 有源电力滤波器(APF)作为一种抑制谐波污染、改善电能质量的有效装置, 已成为人们研究的热点^[1], 在电气化铁路、电力系统、光伏并网^[2-5]等领域有着广泛应用。

基于空间矢量脉宽调制(SVPWM)的滞环电流控制因其较高的直流侧电压利用率, 快速的电流响应和较好的系统鲁棒性^[6-7], 常常用于对电流响应速度要求较高的有源电力滤波器控制系统中, 而这种电流控制系统对电流互感器的依赖较强, 当任一个

电流互感器出现故障时, 均会造成滞环控制失效, 设备退出运行, 因此对交流侧电流互感器进行容错控制及其重要^[8-10]。当故障发生时能够及时改变策略维持系统正常运行, 将故障带来的影响降到最低。

逆变器交流侧互感器的容错控制算法主要有相电流重构法和电流预测法^[11-12]。相电流重构法是通过直流母线传感器来重构三相交流侧电流。当对逆变器施加某一有效非零矢量时, 直流侧母线电流就会反映出某一相的电流信息, 使得三相电流得以重构。但是这种相电流重构法对开关过程过分依赖, 在零矢量时刻直流侧电流不能反映交流侧电流信息, 并且开关时间过短也会使得重构失败, 若对这些情况处理不当将造成很大的误差^[13]。文献[13]从直流电流的振荡、畸变、偏置、幅值及采样的相位、

延迟等方面详细地分析了误差产生的原因, 并提出了一些解决方案。文献[14]在分析脉宽调制的基础上, 提出通过平移桥臂开关状态波形来修整 PWM 信号, 解决了交流永磁电机不可测量区域重构失效的问题。但以上方法均是建立在脉宽调制控制的基础上, 并没有解决相电流重构应用在滞环控制中重构不全的问题。文献[15]基于统计学的方法, 提出可靠度的概念及最小电流偏差绝对值法, 解决了电流滞环型永磁同步电机驱动系统中重构失效的问题, 该方法不引入其他电机参数且不增加硬件成本, 但其算法较为复杂, 在工程应用中并没有表现出更多的优势。电流预测法是通过精确的电路数学模型, 依据系统参数来获得电流值, 文献[16]根据永磁同步电机(PMSM)的数学模型精确计算出了电流参数, 实现了无传感器控制。但这种方法对系统参数依赖较大, 预测结果通常与实际情况有一定的偏差。

本文以滞环 SVPWM 有源电力滤波器为研究对象, 针对以上问题提出了一种新的交流侧互感器容错控制策略。该策略以相电流重构为主, 通过设计状态观测器, 用观测出的电流值来对相电流重构失效的区域进行修正, 解决了空间矢量滞环控制中相电流重构不全的问题。仿真结果和实验结果表明, 所提容错控制策略能够有效重构交流侧相电流, 实现交流侧互感器故障下的容错控制。同时交流侧电流谐波也得到抑制, 进而保证了电源侧的电流品质。

1 APF 滞环 SVPWM 故障容错方法

1.1 滞环 SVPWM 控制原理

典型的基于电压源型三相三线有源电力滤波器的拓扑结构如图 1 所示。

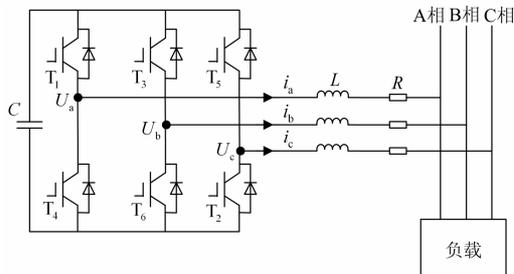


图 1 有源电力滤波器原理图

Fig. 1 Schematic of active power filter

定义 U 为 APF 交流侧输出电压矢量, E 为三相电网电动势, I 为 APF 交流侧输出电流矢量, L 为交流侧电感, R 为交流侧电阻, 通常交流侧电阻可以忽略。可以得到 APF 电压输出端的矢量方程为

$$U = E + L \frac{dI}{dt} + RI \quad (1)$$

根据滞环控制原理, 指令电流 I^* 与真实电流 I 的误差为

$$\Delta I = I^* - I \quad (2)$$

将式(2)代入式(1), 并忽略交流侧电阻可以得到:

$$L \frac{d\Delta I}{dt} = E + L \frac{dI^*}{dt} - U \quad (3)$$

由上式可以看出误差电流矢量的变化率受电网电动势 E , APF 交流侧输出电压矢量 U 和指令电流 I^* 的变化率的影响, 期望得到零误差电流响应, 即令 $\Delta I = 0$, 则 APF 输出的指令电压 U^* 必须满足以下等式:

$$U^* = L \frac{dI^*}{dt} + E \quad (4)$$

由于三相 VSR 可以选择 8 条基本空间电压矢量, 通过式(3)可以得到:

$$L \frac{d\Delta I}{dt} = E + L \frac{dI^*}{dt} - U_k \quad (k=0\sim7) \quad (5)$$

将式(4)代入式(5)得到:

$$L \frac{d\Delta I}{dt} = U^* - U_k \quad (k=0\sim7) \quad (6)$$

由式(6)可知, 误差电流矢量 ΔI 可以通过零误差指令电压 U^* 和可以选择的电压空间矢量 U_k 来控制。

基于 SVPWM 的滞环控制原理如图 2 所示, 首先将三相参考电流值 i_a^* 、 i_b^* 、 i_c^* 与实际电流值 i_a 、 i_b 、 i_c 相比较, 得出的误差电流。误差电流通过滞环比较器输出逻辑信号来实现误差电流 ΔI 的区域检测, 同时将参考电压矢量 U^* 送入区域检测单元, 最后根据误差电流矢量与参考电压矢量的空间位置, 按一定的规则选择出合适的空间电压矢量 U_k , 从而得到 APF 中开关管的控制信号, 实现滞环电流跟踪控制。

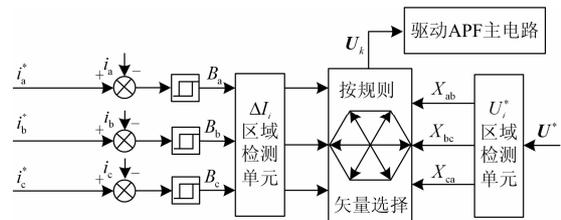


图 2 滞环 SVPWM 控制原理

Fig. 2 Hysteresis SVPWM control principle

1.2 滞环 SVPWM 容错控制策略

由上述原理可知, 滞环 SVPWM 控制方法对电流互感器的依赖程度比较高, 准确得出交流侧及负载侧三相交流电流是整个滞环控制策略的关键。为了保证系统在交流侧互感器故障状态下的可靠运

行, 必须对其进行容错控制。

相电流重构法主要是通过直流母线互感器来重构三相交流侧电流, 当对逆变器施加某一有效非零矢量时, 直流侧母线电流就会反映出某一相的电流信息, 具体对应关系见表 1。

表 1 开关状态与电流对应表

Table1 Switching state corresponds to the current

矢量 U_k	开关状态	i_{dc}
U_0	000	0
U_1	100	i_a
U_2	110	$-i_c$
U_3	010	i_b
U_4	011	$-i_a$
U_5	001	i_c
U_6	101	$-i_b$
U_7	111	0

结合开关函数 $S_j (j = a, b, c)$, 交流侧相电流与直流母线侧电流的关系为:

$$\begin{cases} s_a i_a + s_b i_b + s_c i_c = i_{dc} \\ i_a + i_b + i_c = 0 \end{cases} \quad (7)$$

通过式(7)可以看出这种相电流重构方法依赖开关状态, 在有效开关矢量时直流侧母线才有对应的交流侧等值电流值。通过仿真研究, 如果直接用以上原理对滞环 SVPWM 控制的 APF 系统进行相电流重构将会出现以下问题:

(1) 开关状态对应矢量作用时间过短, 达不到准确重构的最小时间, 则直流电流不稳定, 来不及反映真实的相电流。

(2) 在无效开关管状态时(000 和 111), 直流母线电流互感器将不会反映交流侧电流信息, 无法完成重构。如图 3 所示, 其中黑色包络线为实际交流侧 a 相电流, 深灰色为重构出来的 a 相电流, 因其中间隔有大量无效矢量, 故电流呈脉冲状, 无法连续, 这必定对电流重构精度造成较大影响。

(3) 当直流侧电流互感器长时间只对一相电流时, 其他两相电流因无法更新而出现空缺, 如图 3 中所示的空缺区域。

对于问题 1 所提的矢量作用时间短, 可以通过适当降低开关频率来解决。由于基于空间矢量的滞环控制是固定环宽的, 也就是开关频率不固定, 但是其最大开关频率可以根据系统的直流侧电压、输出电感量和滞环宽度确定。对于滞环宽度为 H 的三相 APF 系统, 最大开关频率位于电网电压的过零处, 通过计算可以得到:

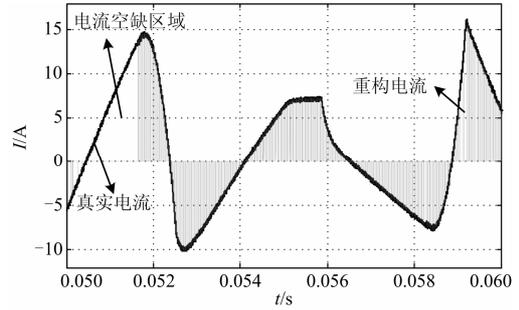


图 3 重构电流波形

Fig. 3 Reconstructed current waveform

$$f_{\max} = \frac{U_{dc}}{6LH} \quad (8)$$

由式(8)可以看出适当增大滞环宽度可以降低最大开关频率, 从而增加相电流重构的精度。

为了解决上述问题(2)、(3), 本文设计了一种电流状态观测器, 根据上一个周期的相电流状态值 $i(k)$ 获得下一个周期的电流状态值 $i(k+1)$, 从而对无效开关矢量造成的电流空缺进行修正。在基于单片机、DSP 等微处理器的离散控制系统中, 由于 AD 采样需要一定的时间, 无法避免会产生一定的延时, 通过设计状态观测器还可以消除延时, 提高采样的精度。有源电力滤波器主电路的在 dq 坐标轴上的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + Bu \\ Y = CX \end{cases} \quad (9)$$

其中, $A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega \\ \omega & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix}$, $C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$,

$$X = \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} e_q & -v_q \\ e_d & -v_d \end{bmatrix}.$$

由状态方程可以构造如图 4 所示的闭环状态观测器, 其中 “^” 表示状态观测估计值, K 表示反馈增益矩阵。

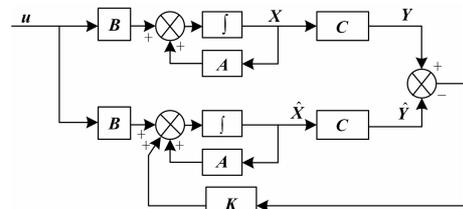


图 4 闭环状态观测原理

Fig. 4 Closed-loop state observer principle

根据闭环状态观测原理, 将状态方程以 T_s 为采样周期进行离散化可以得到式(10)和式(11):

$$\begin{cases} \mathbf{X}(k+1) = \mathbf{GX}(k) + \mathbf{Hu}(k) \\ \mathbf{Y}(k) = \mathbf{CX}(k) \end{cases} \quad (10)$$

其中, $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{G} = \begin{bmatrix} e^{-\frac{R}{L}T_s} & e^{-\omega T_s} \\ e^{\omega T_s} & e^{-\frac{R}{L}T_s} \end{bmatrix}$,

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}T_s}) & \frac{1}{\omega L}(1 - e^{-\omega T_s}) \\ \frac{1}{\omega L}(e^{-\omega T_s} - 1) & \frac{1}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}T_s}) \end{bmatrix}.$$

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1) = \mathbf{G}\hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{Hu}(k) + \mathbf{K}[\mathbf{y}(k) - \hat{\mathbf{y}}(k)] \quad (11)$$

式中反馈增益 \mathbf{K} 的值可以根据观测误差确定, 采用离散状态反馈观测状态变量时的观测误差为

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_r(k+1) &= \mathbf{x}(k+1) - \hat{\mathbf{x}}(k+1) = \\ & [\mathbf{G} - \mathbf{KC}][\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k)] = \\ & [\mathbf{G} - \mathbf{KC}]\mathbf{e}_r(k) \end{aligned} \quad (12)$$

由式(12)可以看出, 状态观测器的观测误差只取决于观测误差初始值, 而与输入变量没有关系, 根据离散系统中的李雅普诺夫和赛尔维斯特判据, 就可以选择出合适的 \mathbf{K} , 使 $\mathbf{e}_r(k+1)$ 趋于零。

结合式(10)和式(11), 就可以得出在 dq 坐标系下电流观测值的表达式为:

$$\begin{cases} \hat{i}_d(k+1) = \hat{\mathbf{G}}_d \hat{i}_d(k) + \mathbf{H}[e_d(k) - v_d(k)] + \mathbf{KC}[i_d(k) - \hat{i}_d(k)] \\ \hat{i}_q(k+1) = \hat{\mathbf{G}}_q \hat{i}_q(k) + \mathbf{H}[e_q(k) - v_q(k)] + \mathbf{KC}[i_q(k) - \hat{i}_q(k)] \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)就可以根据上一采样周期的电流值来观测下一采样周期的电流值, 利用所设计的电流状态观测器, 对滞环 SVPWM 控制中相电流重构失效的区域进行修正, 便可得到完整的三相电流重构值, 根据重构出来的电流值维持系统继续运行下去, 从而实现容错控制。

具体的系统容错控制原理如图 5 所示: 当 APF 系统正常运行中, 采集真实三相电流 i_{a1} 、 i_{b1} 、 i_{c1} 参与滞环电流计算; 若 a 相电流互感器发生故障, 容错控制器根据故障判据迅速判断出故障, 系统算法立即切换至容错控制策略, 此时直流侧电流互感器不仅用于短路及过载保护, 还将参与到容错控制中去。首先在采样控制信号下进行直流侧电流的采样, 得出的直流电流信息用于三相电流的重构, 然后用电流观测器对存在缺失的重构电流进行修正, 最终得出完整的重构电流值 i_{a2} 、 i_{b2} 、 i_{c2} 。谐波检测环节采用快速傅里叶变换法(FFT)进行谐波电流的提取, 指令电流与重构出来的电流相比较, 得出的误差电流值用于 SVPWM 的滞环电流控制, 这样便实现了交流侧电流互感器的容错控制。待故障修复后,

可将容错运行状态切换至正常运行状态, 提高了有源电力滤波器的可靠性。

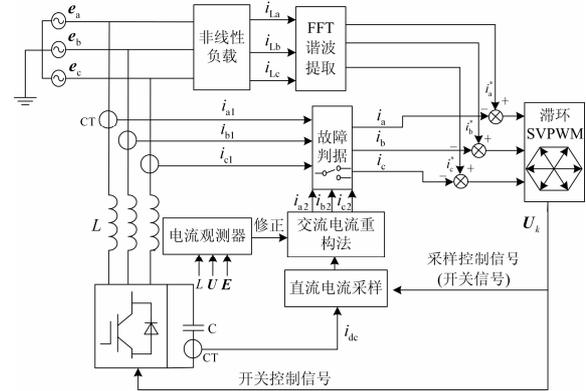


图 5 APF 系统容错控制原理

Fig. 5 Fault-tolerant control theory of APF system

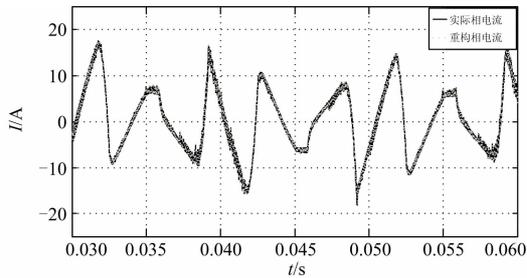
2 仿真与实验

为了验证所提容错策略的可行性, 本文采用 R2011a 版的 Matlab/Simulink 对基于 SVPWM 滞环电流控制的 APF 系统进行仿真研究, 仿真步长为 $5e-6$, 负载采用不控整流桥, 具体仿真参数如下: 电网线电压 380 V, APF 直流侧电压 850 V, 直流侧电容 4 700 μF , 交流侧滤波电感 1.5 mH, 不控制流桥电阻 15 Ω , 采样频率为 10 kHz, 滞环宽度为 0.2 A。

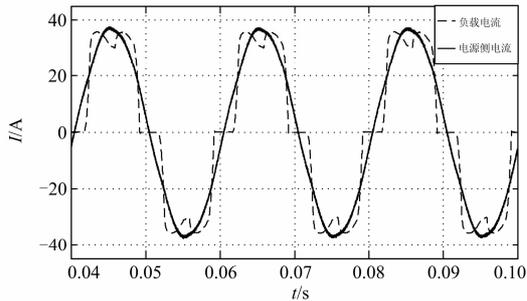
本仿真以 a 相交流侧电流互感器容错控制为例, 研究了容错控制后的系统补偿效果, 仿真结果如图 6 所示。

图 6(a)为 APF 重构相电流与真实相电流的波形对比图, 可以看出所构造的电流值与真实值有较高的吻合度。图 6(b)、(c)分别为正常运行时的电源侧电流、负载电流及容错控制后的电源侧电流、负载电流, 可以看出故障发生后经容错控制依然可以抑制谐波, 保证电源侧电流品质。故障发生后容错控制的效果可以从图 6(d)、(e)中得出, 正常运行时电源侧电流的总谐波畸变率为 2.30%, 容错控制后电源侧电流的总谐波畸变率变为 5.01%, 总谐波畸变率增加了, 可以看出容错控制的效果比正常运行时略差, 电源侧电流品质略有下降, 这是由于不精确的采样, 重构电流与实际电流之间存在极小的误差, 并且电流观测依赖精确的系统参数, 系数参数波形会影响观测结果, 但是这种容错控制只在短期运行, 不影响总体效果。

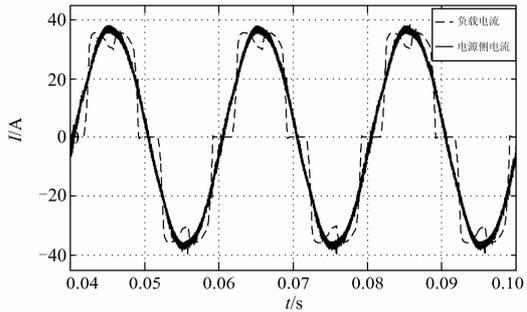
为进一步验证本文所提的容错控制策略的有效性, 本文在三相低压 APF 实验样机上进行了实验研究, 模拟交流侧电流互感器故障状态下 APF 的运行



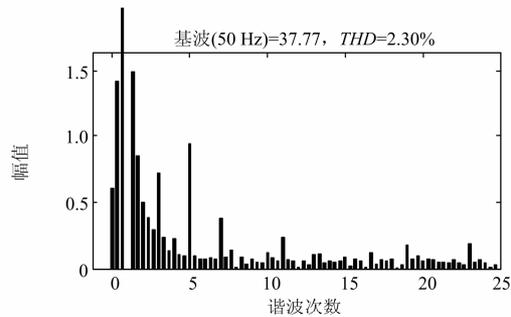
(a) 重构相电流与真实值相电流波形对比



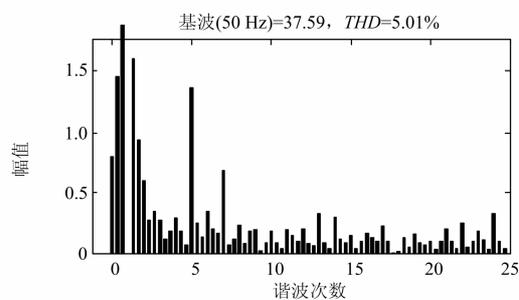
(b) 正常运行时的电流波形



(c) 容错控制后的电流波形



(d) 正常运行时电源侧电流FFT结果

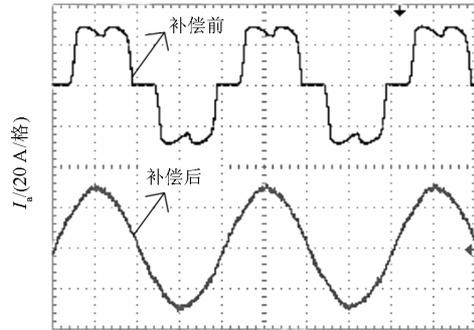


(e) 容错控制后电源侧电流FFT结果

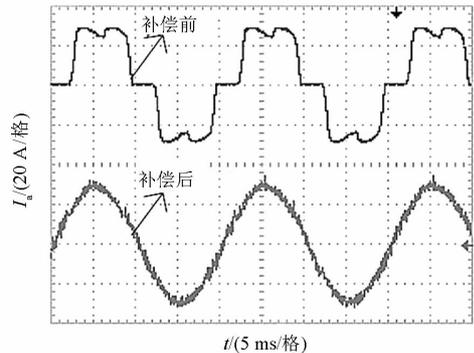
图 6 仿真结果

Fig. 6 Simulation results

效果。主控制芯片采用 TI 公司的 TMS320F28335，主电路开关器件为 StarPower 的 IGBT 模块 (GD200HFT170C2S)，开关频率为 10 kHz，在一个电流采样周期内(10 kHz, 100 μ s)完成状态观测及容错控制,实验参数与仿真一致。采用示波器 Tektronix TDS 2014B 进行实验结果测量,波形如图 7 所示。



(a) 正常运行时的电流波形



(b) 容错控制后的电流波形

图 7 实验结果

Fig. 7 Experimental results

图 7(a)为 APF 正常运行时补偿前和补偿后的电流波形,图 7(b)为容错控制后补偿前和补偿后的电流波形,可以看出容错控制后电源侧电流品质略有下降,但依然能够很好的抑制谐波,从而验证了本文所提容错策略的有效性。通过比较图 6(b)、(c)与图 7(a)、(b)可知,实验结果与仿真结果一致,既验证了仿真结果的正确性,同时也说明了该容错控制策略的实用性。

3 结论

本文针对滞环型 SVPWM 控制的有源电力滤波器,提出了一种交流侧电流互感器的容错控制策略,并对此容错运行进行了仿真和实验。结论如下:

- (1) 该策略依据直流母线电流重构原理,并设计

了电流观测器对重构电流失效的区域进行修正, 解决了相电流重构运用在滞环控制中重构电流不完全的问题。

(2) 仿真和实验结果表明, 根据所提容错控制策略, 系统在电流互感器出现故障后能够依靠残存器件维持运行, 具有很好的实用性, 整个 APF 滤波控制具有更强的适应性和可靠性。

(3) 此方法的电流采样精度不高, 以至于 APF 在故障发生后谐波抑制效果有所降低, 并且容错控制依靠精确的系统参数。

(4) 但是作为一种容错控制策略, 运行时间短, 不失为一种很好的方法, 对 APF 容错控制研究具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 张兴, 张崇巍. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [2] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [3] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-126.
YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-126.
- [4] 胡婷, 刘观起, 韩笑, 等. 基于 APF 的电动汽车充电站谐波治理措施研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(7): 99-104.
HU Ting, LIU Guanqi, HAN Xiao, et al. Study on harmonic elimination of electric vehicle charging station based on APF[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(7): 99-104.
- [5] 葛少云, 董佳霖, 刘福潮, 等. 配电网谐波治理降损效果实证方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(3): 1-4.
GE Shaoyun, DONG Jialin, LIU Fuchao, et al. Empirical method of harmonic control loss reduction effect in distribution network[J]. Proceeding of the CSU-EPSCA, 2015, 27(3): 1-4.
- [6] 李满, 钱平. 基于空间矢量控制策略实现的有源电力滤波器的建模与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 87-93.
LI Man, QIAN Ping. Modeling and analysis of APF based on the strategy of SVPWM[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 87-93.
- [7] 程启明, 胡晓青, 程尹曼, 等. 基于不定频滞环空间电压矢量的有源滤波器电流控制策略研究[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(1): 77-85.
CHENG Qiming, HU Xiaoping, CHENG Yiman, et al. Current control strategy of active power filter based on the indefinite frequency hysteresis space voltage vector[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(1): 77-85.
- [8] 程宏波, 罗杰, 王勋, 等. 一种基于解析冗余的互感器故障的检测及容错方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 69-73.
CHENG Hongbo, LUO Jie, WANG Xun, et al. A novel method for instrument transformer's fault detection and tolerant control based on analytical redundancy[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 69-73.
- [9] 季凌燕, 沈艳霞, 吴定会. 基于灰色动态预测的风力发电系统容错控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 37-43.
JI Lingyan, SHEN Yanxia, WU Dinghui. Research of fault-tolerant strategy for wind energy conversion system based on grey prediction model[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 37-43.
- [10] LEE W C, LEE T K, HYUN D S. Comparison of single-sensor current control in the DC link for three-phase voltage-source PWM converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001, 48(3): 491-505.
- [11] GU Yikun, NI Fenglei, YANG Dapeng, et al. A novel phase current reconstruction method using a single DC-link current sensor[C] // International Conference on Mechatronics and Automation, Changchun, China, 2009: 4874-4879.
- [12] 郭三明, 孙鹏荆, 敬树仁, 等. 基于预测模型的

STATCOM 功率控制策略建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 88-92.

GUO Sanming, SUN Pengjing, JING Shuren, et al. Research on modeling and simulation of power control method for STATCOM based on predictive model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 88-92.

[13] 马鸿雁, 孙凯, 魏庆, 等. PWM 逆变器相电流重构研究与误差分析[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 108-114.

MA Hongyan, SUN Kai, WEI Qing, et al. PWM inverter phase current reconstruction and error analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 108-114.

[14] 顾义坤, 倪风雷, 杨大鹏, 等. 基于母线电流传感器的相电流重构方法[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(6): 811-816.

GU Yikun, NI Fenglei, YANG Dapeng, et al. Novel method for phase current reconstruction using a single DC-link current sensor[J]. Electric Machines and Control, 2009, 13(6): 811-816.

[15] 王伟, 程明, 张邦富, 等. 电流滞环型永磁同步电机驱动系统的相电流传感器容错控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(33): 59-66.

WANG Wei, CHENG Ming, ZHANG Bangfu, et al. Phase current sensor fault-tolerant control on current hysteresis type permanent magnet synchronous motor drive system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(33): 59-66.

[16] 朱喜华, 李颖晖, 张敬. 基于一种新型滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 6-10.

ZHU Xihua, LI Yinghui, ZHANG Jing. Sensorless control of PMSM based on a novel sliding mode observer[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 6-10.

收稿日期: 2015-01-08; 修回日期: 2015-02-28

作者简介:

刘建华(1973-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为供电安全、智能电网与电能质量;

朱蓓蓓(1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为有源电力滤波器; E-mail: zbb_cumt@126.com

张亚健(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为有源电力滤波器。

(编辑 张爱琴)