

直流微电网容错型 DC-APF 设计与特性分析

高晓芝¹, 乔宇¹, 曹欣², 李争¹, 孙会琴¹, 孙鹤旭¹

(1. 河北科技大学 电气工程学院, 河北 石家庄 050018;

2. 河北建投新能源有限公司, 河北 石家庄 050051)

摘要: 直流有源电力滤波器(DC-APF)能够有效抑制直流微网母线电压纹波分量。针对开关器件故障导致DC-APF无法正常工作的问题,提出了一种基于H桥变换器容错型DC-APF拓扑结构,可利用非故障器件拓扑重构保证DC-APF器件故障后的电能质量治理功能。针对容错型DC-APF故障前后拓扑结构改变导致控制参数不确定的问题,提出了变论域自适应模糊PI控制来实现对DC-APF容错模式下补偿电流的有效跟踪控制。在Matlab/Simulink仿真环境中搭建了含容错型DC-APF的直流微电网系统模型,仿真结果表明所设计的DC-APF在器件故障发生前后均对直流母线电压纹波具有良好补偿性能,变论域自适应模糊PI控制具有良好的可实时整定控制器参数的特性。

关键词: 直流有源电力滤波器;容错;纹波;变论域自适应模糊PI;直流微电网

中图分类号: TM72 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed22934

Design and Characteristics Analysis of Fault-tolerant DC-APF for DC Microgrid

GAO Xiaozhi¹, QIAO Yu¹, CAO Xin², LI Zheng¹, SUN Huiqin¹, SUN Hexu¹

(1. School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, Hebei, China; 2. Hebei Construction & Investment Group New Energy Co., Ltd., Shijiazhuang 050051, Hebei, China)

Abstract: DC active power filter (DC-APF) can effectively suppress the bus voltage ripple of DC microgrid. In order to solve the problem that DC-APF can not work normally due to the failure of switching devices, a fault-tolerant DC-APF topology based on H-bridge converter was proposed, which could ensure the power quality management function of DC-APF after the device failure by using the topology reconstruction of non fault devices. Aiming at the problem that the topological structure is changed before and after the fault which causes the control parameters to be uncertain, a variable universe adaptive fuzzy PI control was proposed to track and control the compensation current effectively in DC-APF fault-tolerant mode. A DC microgrid system model with fault-tolerant DC-APF was built in Matlab/Simulink simulation environment. The simulation results show that the proposed DC-APF has good compensation performance for DC bus voltage ripple before and after the device failure, and the proposed variable universe adaptive fuzzy PI control has a good characteristic of real-time tuning controller parameters.

Key words: DC active power filter (DC-APF); fault tolerance; ripple; adaptive fuzzy PI with variable universe; DC microgrid

当直流微电网中直流母线电压存在纹波分量时,将会影响系统用电设备的安全运行^[1]。直流有源滤波器(DC active power filter, DC-APF)可实现直流微网母线电压纹波的有效抑制。但在实际应用中,有源电力滤波器(active power filter,

APF)开关器件长期处于高频工作状态,易发生短路、开路等故障^[2],故障的产生将导致APF无法实现预期功能。因此,APF的容错研究成为该领域的研究热点。

文献[3-4]研究了APF的容错方案并分析了

基金项目: 河北省重点研发计划项目(19214501D, 20314501D);河北省高层次人才资助项目(A201905008);留学人员科技活动项目择优资助(C2015003043)

作者简介: 高晓芝(1981—),女,博士,讲师,Email:gaoxiaozhi@hebest.edu.cn

通讯作者: 李争(1980—),男,博士,教授,Email:Lzhfgd@163.com

容错型 APF 的结构和运行模式。文献[5-7]中提出了几种开路故障诊断方法,为 APF 的故障诊断研究提供了指导。文献[8]采用前馈控制来解决 APF 容错状态下直流侧两电容中点电位不平衡的问题,提高了 APF 补偿效果。文献[2]将故障开关器件所在桥臂连接到 APF 直流侧电容中点来实现容错型 APF 的冗余操作,分析了容错型 APF 的工作原理,在 PI 控制的基础上引入重复控制来优化 APF 的补偿性能。文献[9]研究了基于 T 型逆变器结构的容错型 APF,分析 APF 的故障类型,并利用 T 型三电平逆变器的冗余特性,给出了针对水平和垂直桥臂开关器件故障的容错控制策略。文献[10]针对传统 PR 控制器存在的缺点,提出基于准 VPI 控制器的补偿电流跟踪策略,但该控制策略无法对控制器参数进行实时调整,也未考虑容错模式下电路参数发生改变时对控制器参数的影响。以上文献均对 APF 的容错方法展开研究,但其研究对象为交流型 APF。文献[11]对几种常规的 DC-APF 电路结构进行了分类讨论。

综合考虑现有的交流型 APF 容错拓扑结构与控制方法并结合常见的直流型 APF 拓扑结构,本文提出了基于 H 桥变换器改进的容错型 DC-APF 拓扑结构及控制方法。仿真结果表明本文所提容错型 DC-APF 在器件故障发生前后均对直流母线电压纹波具有良好补偿效果。

1 容错型 DC-APF 拓扑结构及原理

1.1 容错型 DC-APF 的拓扑结构

本文所提出的容错型 DC-APF 拓扑结构如图 1 所示,容错型 DC-APF 由 H 桥开关变换器、可触发开关、双向晶闸管开关和直流侧电容组成。 L_1 为滤波电感; T_1 为隔离变压器; K_1, K_2 和 K_3 为可触发开关,当系统正常运行, K_2 和 K_3 为闭合状态, K_1 为容错型 DC-APF 的启动开关; Q_1 和 Q_2 为双向晶闸管开关,当系统正常运行时, Q_1 和 Q_2 为关断状态。

本文所提出的容错型 DC-APF 模型与传统 DC-APF 模型相比,尽管器件增加,但其增加的电路元件均价格不高,其额外增加的一次性投入成本相对较低。而且从系统运行角度考虑,容错型 DC-APF 可在开关器件故障时,通过拓扑重构继续工作保证系统的电能质量,避免了常规 DC-APF 停运造成的用电设备无法正常工作问题,总体经济效益较好。

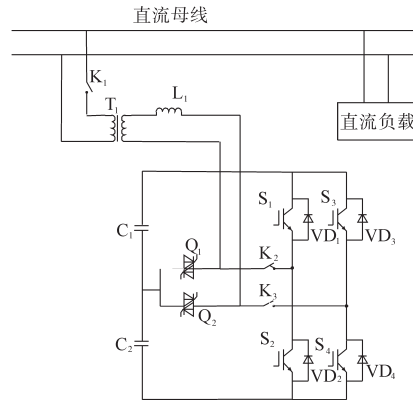


图1 容错型 DC-APF 的拓扑结构

Fig.1 Topology of fault-tolerant DC-APF

1.2 容错型 DC-APF 的工作原理

APF 常见故障类型多为开路故障和短路故障,而短路故障在开关器件侧加快速熔断器元件时又会转换为开路故障,因此本文只针对 APF 的开路故障进行研究。

当容错型 DC-APF 的开关器件发生开路故障时,可通过故障诊断方法确定故障开关器件的所在位置,再根据故障开关器件的位置驱动对应的可触发开关和双向晶闸管开关。由于本文主要研究容错型 DC-APF 的拓扑结构和控制方法,针对 H 桥变换器的开关器件故障诊断,文献[12-13]已经做了大量研究,提出了几种简单实用的故障诊断方法,因此本文在此不做过多陈述。容错型 DC-APF 故障切换判断模式如图 2 所示,如当开关器件 S_1 发生故障时,通过驱动控制切断开关 K_2 ,即断开开关器件 S_1 和 S_2 所在的故障桥臂,接通双向晶闸管开关 Q_1 ,使该故障相端点连接到直流侧电容 C_1 和 C_2 的中点,得到如图 3a 所示的容错型 DC-APF 的重构拓扑结构一。当开关器件 S_3 发生故障时,通过驱动控制切断开关 K_3 ,即断开开关器件 S_3 和 S_4 所在的故障桥臂,接通双向晶闸管开关 Q_2 ,使该故障相端点连接到电容 C_1 和 C_2 的中点,得到容错型 DC-APF 的重构拓扑结构二,如图 3b 所示。

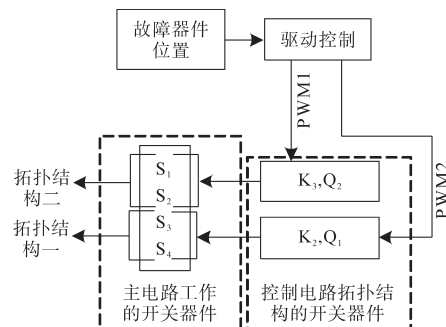


图2 容错型 DC-APF 故障切换判断模式

Fig.2 Fault-tolerant DC-APF failover judgment mode

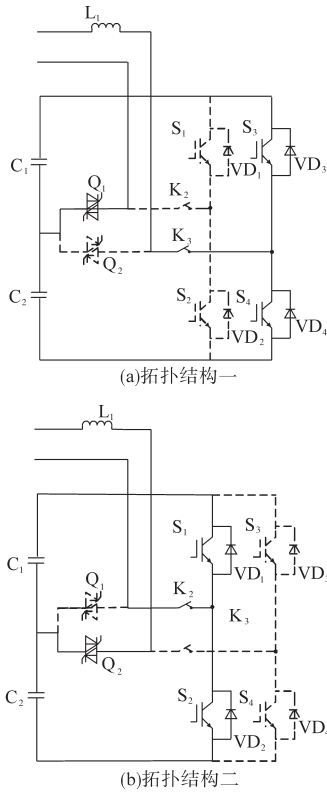


图3 电路重构后的容错型DC-APF拓扑结构

Fig. 3 Fault-tolerant DC-APF topology after circuit reconstruction

1.3 容错型DC-APF适用的开关器件故障类型

对容错型DC-APF所适用的开关器件故障状态进行分析,结果如表1所示,拓扑结构一适用于开关管S₁,S₂单独故障和开关管S₁,S₂共同故障时;拓扑结构二适用于开关管S₃,S₄单独故障和开关管S₃,S₄共同故障时;对于单开关器件故障,容错型DC-APF适用于开关管S₁,S₂,S₃和S₄单独故障;对于双开关器件故障,容错型DC-APF仅适用于同一桥臂上的两个开关器件故障。

表1 容错型DC-APF适用的开关器件故障状态

Tab.1 Fault states of fault-tolerant DC-APF switching devices

运行情况	S ₁ 故障	S ₂ 故障	S ₃ 故障	S ₄ 故障	S ₁ ,S ₂ 故障	S ₃ ,S ₄ 故障
系统是否可进行重构	是	是	是	是	是	是
适用的拓扑	结构一	结构一	结构二	结构二	结构一	结构二

容错型DC-APF拓扑结构一的工作模式如图4所示。

工作模式1:如图4a所示,当容错型DC-APF产生的补偿电流*i_p*在正方向,且数值上小于纹波电流时,开关管S₄导通,断开S₃,二极管VD₃和VD₄反向截止,此时电感L₁上的电流将会在正向上增加,则有:

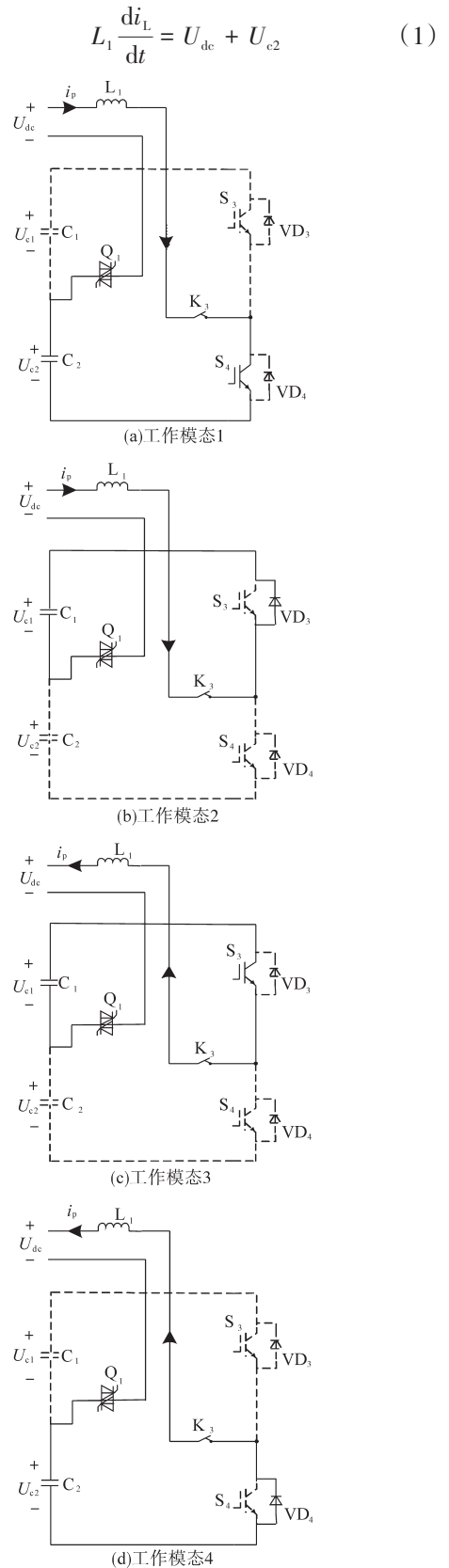


图4 容错型DC-APF拓扑结构一的工作模式

Fig. 4 The working mode of fault-tolerant DC-APF topology one

工作模式2:如图4b所示,当容错型DC-APF产生的补偿电流*i_p*在正方向,且在数值上大于纹波

波电流时,将开关管 S_4 和 S_3 关断,二极管 VD_4 反向截止, VD_3 正向导通,电感电流经 VD_3 续流,此时电感将储存的能量释放,电感电流将会在正方向上减小,则有:

$$L_1 \frac{di_L}{dt} = U_{dc} - U_{c1} \quad (2)$$

工作模式3:如图4c所示,当容错型DC-APF产生的补偿电流 i_p 在负方向,且在数值上小于纹波电流时,使开关管 S_3 导通, S_4 关断,二极管 VD_3 和 VD_4 反向截止,此时电感储存能量,电感电流将会在反向上增加,则有:

$$L_1 \frac{di_L}{dt} = U_{dc} - U_{c1} \quad (3)$$

工作模式4:如图4d所示,当容错型DC-APF产生的补偿电流 i_p 在负方向,且在数值上大于纹波电流时,将开关管 S_4 和 S_3 关断,此时二极管 VD_4 正向导通,电感电流经 VD_4 续流, VD_3 反向截止,电感电流将会在反向上减小,则有:

$$L_1 \frac{di_L}{dt} = U_{dc} + U_{c2} \quad (4)$$

通过上述分析,当补偿电流 $i_p > 0$ 时,容错型DC-APF处于Boost状态,电感电流在正半周期内进行增大和减小;当补偿电流 $i_p < 0$ 时,容错型DC-APF处于Buck状态,电感电流在负半周期内进行增大和减小;根据检测到的纹波电流,控制容错型DC-APF产生纹波补偿电流,对纹波电流分量进行抵消,从而起到抑制电压纹波的作用。由于拓扑结构二和拓扑结构一的工作模式类似,因此本文在此不做过多陈述。

2 DC-APF容错控制方法

2.1 容错型DC-APF的整体控制策略

DC-APF控制系统的完整结构图如图5所示,包括纹波电流分量的提取、直流侧补偿电容电压控制和变论域自适应模糊PI控制。

1)纹波分量的提取主要由低通滤波器实现。

2)采用基于PI控制的电容均压控制策略来消除容错状态下直流侧两电容中点电位不平衡的问题。

3)由于容错型DC-APF在故障发生后进行了拓扑重构,为确保DC-APF对纹波的补偿性能,DC-APF的控制参数需要根据新形成的拓扑结构进行相应的调整。在传统模糊控制中,参考专家

经验所设定模糊基本论域范围一经设定无法改变,不能及时跟随DC-APF电路特征改变而调整。因此,本文采用了变论域自适应模糊PI控制,通过伸缩因子对模糊控制的论域范围进行调整,将调整结果与输入量一起传递至变论域模糊控制器,输出比例参数和积分参数的调整系数,进一步调节PI控制器,实现对系统的有效控制。

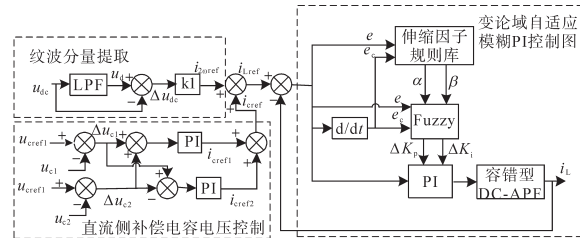


图5 控制系统完整结构图

Fig.5 Complete structure diagram of the control system

图6所示为论域伸缩原理。设纹波电流偏差值 e 和偏差值变化率 e_c 的初始论域为 $[-E, E]$,其中 α 表示的是伸缩因子,其功能是对输入控制器的论域范围进行调节,调节规则为根据纹波电流偏差值 e 和纹波电流偏差变化率 e_c 数值大小的变化,对论域的范围进行相应地收缩和扩展,来提高系统的控制速度和计算精度。

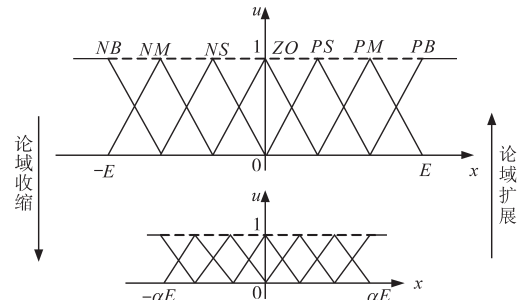


图6 论域伸缩原理

Fig.6 Theory of domain scaling

2.2 模糊PI控制器

设定模糊PI控制输入量为 e 和 e_c ,输出量为 ΔK_p 和 ΔK_i ,根据参考文献[14]中模糊基本论域范围方法以及相关专家经验,设定偏差 e 的变化区间在给定值的6%以内,偏差变化率 e_c 变化区间在偏差范围的10%以内,取PI控制初始参数的20%作为模糊控制器输出参数的基本论域范围。本文仿真系统中直流母线电流为10A,偏差 e 和偏差变化率 e_c 的基本论域范围可根据上述规则进行计算,其结果如表2所示。

采用对称、均匀分布的三角形函数作为其隶属度函数。模糊推理之后,将输出值进行去模糊化,使其变换成准确值,最后输出 $\Delta K_p, \Delta K_i, PI$ 控制器的

比例系数 K_p 和积分系数是 K_i 的计算公式如下:

$$\begin{cases} K_p = K_p^* + \Delta K_p \\ K_i = K_i^* + \Delta K_i \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\Delta K_p, \Delta K_i$ 为模糊控制器的输出值; K_p^*, K_i^* 分别为PI控制器的比例系数和积分系数的初始值。

表2 模糊控制参数

Tab.2 Fuzzy control parameters

模糊控制器参数	基本论域	模糊论域	转化因子
偏差 e	$[-0.6, 0.6]$	$[-3, 3]$	5
偏差变化率 e_c	$[-0.06, 0.06]$	$[-0.6, 0.6]$	10
比例参数修正量 ΔK_p	$[-0.48, 0.48]$	$[-0.6, 0.6]$	0.8
积分参数修正量 ΔK_i	$[-2.4, 2.4]$	$[-3, 3]$	0.3
模糊子集	$[NB \ NM \ NS \ ZO \ PS \ PM \ PB]$		

2.3 变论域自适应模糊PI控制论域调整策略

变论域的关键在于论域可以根据系统输入和输出变量的变化而进行相应调整。设输入、输出变量的基本论域分别为

$$\begin{cases} X(x) = [-\alpha(x) \times E, \alpha(x) \times E] \\ Y(y) = [-\beta(x) \times K, \beta(x) \times K] \end{cases} \quad (6)$$

式中: $X(x)$ 为输入变量的基本论域; $Y(y)$ 为输出变量的基本论域; $\alpha(x), \beta(x)$ 分别为输入变量和输出变量的伸缩因子; $[-E, E]$ 和 $[-K, K]$ 分别为输入变量和输出变量的初始论域; x 为输入变量; E 表示输入变量 e 和 e_c ; K 表示输出变量 ΔK_p 和 ΔK_i 。

本文采用基于误差分级的方法来选取伸缩因子,将纹波电流修正后的参考值与补偿电流实际值的偏差划分为五个区域,如表3所示。其中 e_{\max} 为偏差的最大值,取 $e_{\max} = e_{\text{in}}, e_{\text{in}}$ 为参考输入量。根据划分的偏差区域,设置相应的伸缩因子。根据PI参数的整定原则来选取伸缩因子,比例参数的伸缩因子选取规则是与偏差的单调性一致;积分参数的伸缩因子选取规则是与偏差的单调性相反。其中, α_e/α_{ec} 为纹波电流偏差与偏差变化率所对应的伸缩因子, β_{kp} 为比例参数所对应的伸缩因子, β_{ki} 为积分参数所对应的伸缩因子。

表3 偏差分区选取伸缩因子值

Tab.3 Selection of scaling factors for deviation zones

偏差区域	伸缩因子取值		
	α_e/α_{ec}	β_{kp}	β_{ki}
区域1: $[-e_{\max}, -0.8e_{\max}] \cup [0.8e_{\max}, e_{\max}]$	0.8	1.0	0.1
区域2: $[-0.8e_{\max}, -0.6e_{\max}] \cup [0.6e_{\max}, 0.8e_{\max}]$	0.7	0.8	0.3
区域3: $[-0.6e_{\max}, -0.4e_{\max}] \cup [0.4e_{\max}, 0.6e_{\max}]$	0.5	0.6	0.5
区域4: $[-0.4e_{\max}, -0.2e_{\max}] \cup [0.2e_{\max}, 0.4e_{\max}]$	0.3	0.4	0.7
区域5: $[-0.2e_{\max}, 0.2e_{\max}]$	0.2	0.2	0.9

3 仿真验证及结果分析

本文主要针对所设计的容错型DC-APF对纹波的补偿效果进行研究,在Matlab/Simulink软件中搭建了含容错型DC-APF的简化直流微电网仿真系统模型,来验证所提出的容错型DC-APF对纹波的补偿效果以及容错能力。设置交流电网电压三相不对称,使直流母线中产生纹波分量,该纹波分量主要是二倍频纹波分量^[15]。双向DC-AC变换器参数设置为:开关频率10 kHz,直流侧稳压电容2 000 μF ;直流负荷为纯阻性,其值为20 Ω 。容错性DC-APF参数:直流侧两电容总电压设置为250 V,滤波电感参数为2 mH,电容值为1 100 μF ;系统的直流母线电压为200 V;模拟分布式电源功率为2 000 W。

系统从0 s开始运行,在0.3 s时启动DC-APF,使其对直流母线电压纹波进行补偿;在0.5 s时,开关管 S_1 发生开路故障,在0.6 s时DC-APF容错控制系统切换到拓扑结构一继续运行,得到的直流母线电压波形如图7所示。可以看出,故障前DC-APF对直流母线电压纹波有良好的抑制效果;当0.5 s时, S_1 发生开路故障,DC-APF在重构前无法根据检测的纹波电流产生相应的补偿电流,如图7c所示;DC-APF在0.6 s时进行拓扑重构,重构后的拓扑结构对应图3中的拓扑结构一,此时可重新对直流母线电压纹波进行跟踪补偿,保证了所设计的DC-APF的容错能力。

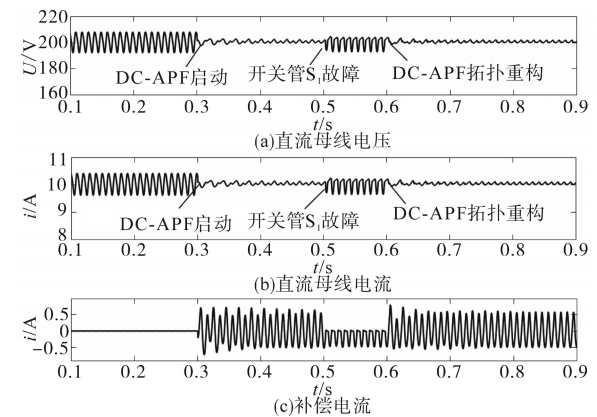


图7 开关管 S_1 故障下的直流母线电压、电流与补偿电流

Fig.7 DC bus voltage, DC load current and compensation current under switch S_1 fault

为了检验容错型DC-APF对纹波的补偿效果,本文对直流母线电压波形分别进行纹波系数计算和快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)分析。首先对图8中的数据进行分析,在初

始阶段母线电压纹波幅值约为 8.94 V,此时 DC-APF 尚未启动,对应的纹波系数为 4.49%;在 0.3 s DC-APF 开始工作,电压纹波幅值下降到 1.11 V 左右,对应的纹波系数为 0.55%;在 DC-APF 发生故障后,电压纹波幅值升高到 5.31 V 左右,纹波系数为 2.66%;在拓扑重构后,电压纹波的幅值约为 1.12 V,纹波系数为 0.56%。本文中直流母线电压纹波系数 δU 计算公式为

$$\delta U = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{up} - U_{low}}{U_{average}} \quad (7)$$

式中: U_{up} 为直流母线电压波峰值; U_{low} 为直流母线电压波谷值; $U_{average}$ 为直流母线电压平均值。

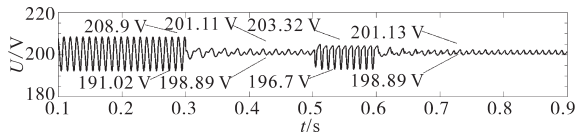


图8 开关管 S_1 故障下的直流母线电压
Fig.8 DC bus voltage under switch S_1 failure

然后对容错型 DC-APF 启动前、故障前、故障后和重构后的直流母线电压波形进行 FFT 分析,其结果如图 9 所示。DC-APF 启动前,直流母线电压纹波的总谐波畸变率(total harmonic distortion, THD)值为 5.56%,DC-APF 故障发生前对直流母线电压纹波进行补偿后的 THD 值为 0.54%,DC-APF 故障发生后,直流母线电压纹波的 THD 值为 2.64%,DC-APF 在容错模式下进行拓扑重构后,对直流母线电压纹波进行补偿得到的 THD 为 0.58%。与 DC-APF 故障发生前相比,虽然母线电压纹波含量略微上升,但仍可说明容错型 DC-APF 在故障发生前后均能有效地降低纹波含量。

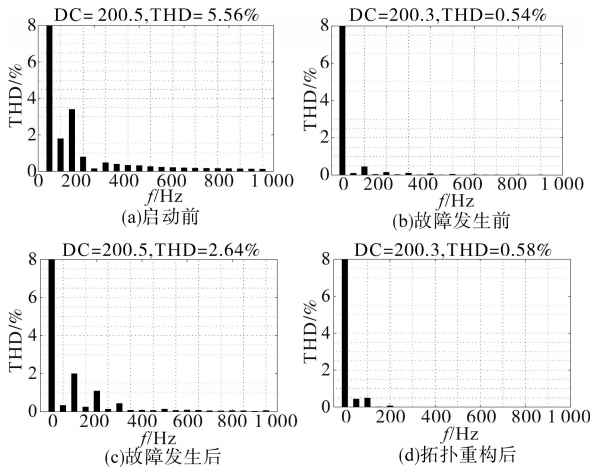


图9 DC-APF 启动前、故障发生前、故障发生后和拓扑重构后的直流母线电压纹波分量的 THD 与频谱

Fig.9 Before the DC-APF is started, before the fault occurs, after the fault occurs and after the topology reconstruction THD and spectrum of DC bus voltage ripple

为了进一步验证容错型 DC-APF 对其它开关故障的容错能力,分别进行了开关管 S_1 和 S_2 同时故障、开关管 S_3 故障时的仿真研究,如图 10 和图 11 所示。

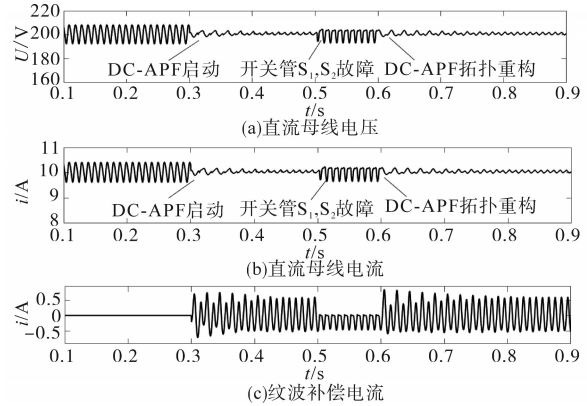


图10 开关管 S_1, S_2 故障下容错型 DC-APF 直流母线电压、电流与纹波补偿电流

Fig.10 DC bus voltage, DC load current and ripple compensation current of the fault-tolerant DC-APF under switch S_1 and S_2 fault

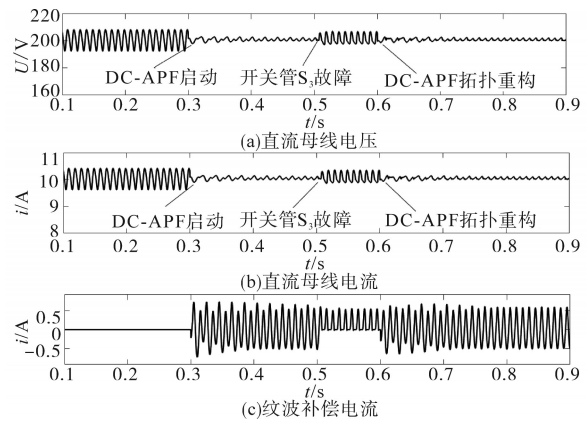


图11 开关管 S_3 故障下容错型 DC-APF 直流母线电压、电流与纹波补偿电流

Fig.11 DC bus voltage, DC load current and ripple compensation current of the fault-tolerant DC-APF under switch S_3 fault

从图 10 中可以看出,当开关管 S_1 和 S_2 故障时,重构前 DC-APF 只能生成负半轴的补偿电流来补偿纹波的正半轴,无法补偿负半轴的纹波,其补偿效果很差;当 DC-APF 系统重构后,则可继续对纹波进行有效补偿,重构后对应图 3 中的拓扑结构一。开关管 S_1 故障、开关管 S_2 故障以及开关管 S_1 和 S_2 同时故障时的母线电压、电流波形类似,拓扑二所对应的开关管 S_3 故障、 S_4 故障以及 S_3 和 S_4 同时故障时的母线电压、电流也比较类似,为节省篇幅,本文只节选了开关管 S_3 故障时的仿真图形进行分析说明。如图 11 所示,当开关管 S_3 故障时,重构前 DC-APF 只能生成正半轴的补偿

电流来补偿纹波的负半轴,无法补偿正半轴的纹波。当DC-APF容错控制系统在0.6 s进行系统重构后,则可继续实现对纹波的有效补偿,重构后对应图3中的拓扑结构二。通过以上仿真研究结果,进一步验证了本文所设计的容错型DC-APF适用于表1中所提出的6种故障类型。

为了验证本文所提方法对容错型DC-APF的控制效果,在其它参数不变的情况下,分别采用PI、模糊PI控制以及本文所提方法对容错型DC-APF进行仿真研究。在0.5 s时设置 S_1 和 S_2 同时发生开路故障,容错控制系统启动容错模式运行,得到的直流母线电压波形如图12所示。由图12可见,传统PI控制在容错型DC-APF拓扑重构后由于不能自动调整PI参数导致容错型DC-APF对纹波抑制效果大大降低,直流母线电压波动较大;图12b为采用模糊PI控制的容错型DC-APF直流母线电压波形图,由于模糊PI控制能够自动调整PI参数,拓扑重构后输出的补偿电流能够实时跟踪指令电流,与传统PI控制方式相比,其纹波抑制效果已经有了明显提高,超调现象也被消除。而将模糊PI控制以及本文所提方法相比,如图12b、图12c所示,由于模糊PI控制的论域范围不会跟随系统运行状态的改变而自适应地做出调整,本文所提方法直流母线电压波动最小,纹波抑制效果优于模糊PI控制。

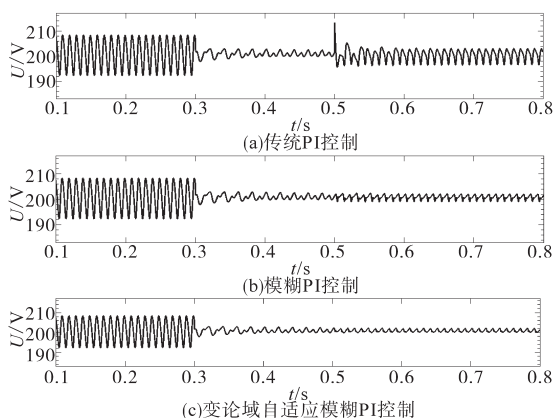


图12 传统PI控制、模糊PI控制和变论域自适应模糊PI控制下的直流母线电压

Fig.12 DC bus voltage under traditional PI control, fuzzy PI control and variable-domain adaptive fuzzy PI control

4 结论

为提高现有DC-APF的工作可靠性,本文对DC-APF的常规H桥电路进行改进,提出一种基于H桥变换器改进的容错型DC-APF拓扑结构及

其控制方法。拓扑结构方面,分析了该容错型DC-APF适用的故障类型,整合了拓扑重构后的容错型DC-APF工作模态并利用非故障器件实现故障后系统重构。控制方法方面,针对容错型DC-APF故障前后因拓扑结构的改变造成控制参数也需要相应调整的问题,提出了变论域自适应模糊PI控制方法。仿真实验验证了容错型DC-APF所适用的开关器件故障类型及其在故障发生前后的工作可靠性;多种控制方法故障补偿效果综合对比也验证了所提出的变论域自适应模糊PI控制具有更好的补偿效果,具备可实时整定控制器参数的特性。

参考文献

- [1] 周小平, 罗安, 陈燕东, 等. 直流微电网中双向储能变换器的二次纹波电流抑制与不平衡控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2682-2688.
Zhou Xiaoping, Luo An, Chen Yandong, *et al.* Secondary ripple current suppression and imbalance control strategy in bidirectional storage converter of DC microgrid [J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2682-2688.
- [2] Xu Q W, Wang Y, Wang M, *et al.* A novel fault-tolerant shunt active power filter and its control strategy[C]//2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics, Buzios, IEEE, 2015: 196-201.
- [3] 李刚, 樊晓平, 彭劲杰. 三相四开关结构的容错型有源电力滤波器[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(2): 88-92.
Li Gang, Fan Xiaoping, Peng Jinjie. Three-phase four-switch structure fault-tolerant active power filter[J]. Journal of Power Systems and Automation, 2013, 25(2): 88-92.
- [4] Peng T, Zhao S, Han B, *et al.* Open-circuit fault diagnosis and fault tolerance for shunt active power filter[J]. Journal of Central South University, 2017, 24(11):2582-2595..
- [5] Zhang H, Sun C D, Li Z, *et al.* Voltage vector error fault diagnosis for open-circuit faults of three-phase four-wire active power filters[J], IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3): 2215-2226.
- [6] 刘建平, 侯凯, 李伟邦, 等. 串联IGBT保护模块设计和故障诊断分析[J]. 电气传动, 2015, 45(10):76-80.
Liu Jianping, Hou Kai, Li Weibang, *et al.* Design and fault diagnosis analysis of series IGBT protection module[J]. Electric Drive, 2015, 45(10): 76-80.
- [7] Caseiro L M A, Mendes A M S, Lopes P M A. Open-circuit fault diagnosis in neutral-point-clamped active power filters based on instant voltage error with no additional sensors[C]//2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Charlotte, IEEE, 2015: 2217-2222.
- [8] 王兰, 陈俐. 三相四开关有源电力滤波器的容错控制技术