DOI：10.7500/AEPS20130708003

容错型三相四开关有源电力滤波器及其控制策略

谭兴国[1,2]，王　辉[2]，张　黎[2]，李庆民[2]
（1. 河南理工大学电气工程与自动化学院，河南省焦作市 454003；2. 山东大学电气工程学院，山东省济南市 250061）

摘要：有源电力滤波器（APF）多基于三相六开关拓扑，为提高其运行可靠性，提出一种基于元件冗余的三相四开关容错型 APF。针对三相六开关 APF 的故障判别，应用功率器件承受电压变化识别桥路开路故障；研究了基于谐波检测 APF 补偿算法与控制电源电流跟踪电网电压 APF 补偿算法的关系，指出容错型 APF 切换控制中更适合采用电源电流直接跟踪补偿算法；在三相四开关 APF 数学模型基础上，研究了直流母线中点偏移对三相四开关 APF 补偿性能的影响，提出一种直流中点电压差值前馈补偿方法。扩展了配置直流侧储能的情况下，容错型 APF 的有功调节实现方法；设计了 APF 容错控制切换策略和硬件实现的电流滞环跟踪控制电路，在建立的三相四开关 APF 平台上，实验验证了所提方法的有效性。

关键词：有源电力滤波器；三相四开关；电压前馈控制；容错；直流中点偏移；谐波检测

0　引言

作为电力系统电能质量控制的有效装置，基于主动滤波原理的三相六开关并联型有源电力滤波器（APF）得到广泛应用。三相六开关逆变器是 APF 的核心部件，其中的功率半导体器件及控制电路是最易发生故障的薄弱环节，其可靠性尚未得到有效解决[1]。目前常用的逆变器容错方案，包括双机备份、桥臂冗余、三相四桥臂冗余和四开关两相容错[2]等方式。双机备份采用两套逆变器，可靠性高，但系统结构复杂，体积和成本较高，设备利用率低。桥臂冗余是在某一桥臂发生故障时，通过隔离措施将故障桥臂与负载隔离，将输出相切换到辅助桥臂上；这种方式开关较多，驱动和辅助装置繁杂。三相四桥臂冗余和四开关两相容错，均将负载中点与辅助桥臂相连，使之工作于两相状态继续运行，并不适于 APF 容错。

在提高 APF 装置可靠性和利用率、减小装置体积和成本的角度，且不增加功率器件冗余的前提下，提出三相四开关的 APF 容错方案。本文应用器件承压变换法对 APF 开路故障进行识别，设计了三相四开关 APF 容错切换控制策略；针对三相四开关 APF 的特点，探讨了容错控制中对直流中点电位平衡的特殊要求，并制定了相应的补偿策略；讨论了容错型 APF 两类补偿策略的关系，并基于电源电流跟踪补偿 APF 策略，设计了 APF 的容错控制方法。为适应未来储能应用，拓展了 APF 的有功调节功能；基于电流滞环跟踪方法建立三相四开关容错型 APF 实验平台，对所提方法进行验证。

1　容错型 APF 控制原理

1.1　容错型 APF 拓扑

按照最小元件冗余，同时具有一定可靠性原则，本文提出三相四开关容错型 APF 拓扑，见图 1。

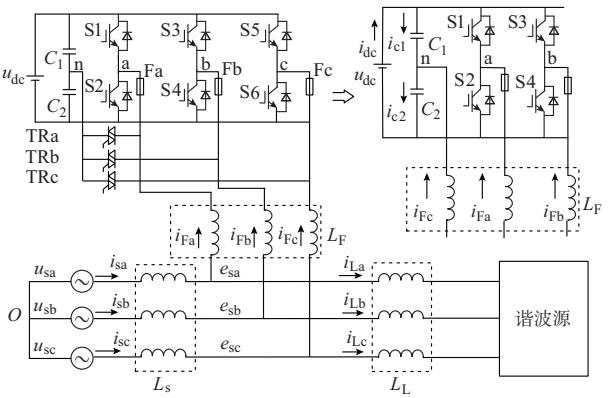

图 1　三相四开关容错型 APF 拓扑
Fig.1　Fault tolerant APF based on three-phase four-switch topology

图 1 实质是将桥臂冗余拓扑中由开关器件构成的辅助桥臂，用串联的无源电容代替。正常工作时，三个双向晶闸管 TRa 至 TRc 均处于关断状态。当检测到某一相桥臂出现故障时，采用快速熔断器和

收稿日期：2013-07-08；修回日期：2014-03-29。
国家自然科学基金资助项目（51107068）；河南省高等学校控制工程重点学科开放实验室开放基金资助项目（KG2014-14）；新能源电力系统国家重点实验室开放课题资助项目（LAPS13017）。

半导体开关器件将故障桥臂隔离，并驱动相连的双向晶闸管触发导通，故障桥臂被串联电容取代，APF在三相四开关拓扑下维持容错运行。

1.2　故障识别方法

APF 容错控制中，故障识别是实施容错控制的前提。本文主要对 APF 中的开路和短路故障进行判别与容错。对于功率元件的开路故障，可通过一定的技术手段提取系统的故障信息进而实现诊断和定位，包括专家系统法、电流故障诊断法和电压故障诊断法[3]等；而短路故障则通过在逆变器桥臂中植入快速熔丝，使功率管的短路故障转变为开路故障再进行处理。

本文利用开路故障前后绝缘栅双极型晶体管(IGBT)集电极和发射极承受的电压变化，作为APF 开路故障的判据。以图 1 所示的 C 相开路故障为例，表 1 列出了该桥臂上 IGBT 在故障前后承受的集射极间压降变化。

表 1　C 相开路故障 IGBT 承受电压变化
Table 1　IGBT voltage change in phase C open-circuit fault

i_c	s_5,s_6	正常		S5 开路		S6 开路	
		u_5	u_6	u_5	u_6	u_5	u_6
+	1,0	0	u_{dc}	u_{dc}	0	0	u_{dc}
	0,0	u_d	0	u_{dc}	0	u_{dc}	0
	0,1	u_{dc}	0	u_{dc}	0	u_{dc}	0
−	1,0	0	u_{dc}	0	u_{dc}	0	u_{dc}
	0,0	0	u_{dc}	0	u_{dc}	0	u_{dc}
	0,1	u_{dc}	0	u_{dc}	0	0	u_{dc}

表 1 中：i_c 为故障相电流，电流流出为正；s_5，s_6 为 C 相 IGBT S5 和 S6 对应的开关信号组合，为 1 表示开通，0 表示关闭；u_5，u_6 分别为开关管 S5，S6 承受的集射极电压。由表 1 可见，功率器件开路故障信息与故障相输出相电流方向、开关信号有密切关系：在相电流为正的情况下，上管(S5)开路，在开关状态(1,0)时，上下功率管状态不同于正常状态；同理，在电流为负的情况下，下管(S6)开路故障，在(0,1)开关状态时，功率管电压异于常态。若同时出现上下管开路故障，上述规律依然适用。据此即可识别 APF 逆变桥臂上出现的开路故障。

1.3　APF 容错切换策略

通过功率元件上配置的电压传感器和逻辑判断电路，按照器件集射极电压变化规律，即可对故障桥臂进行定位；确认故障发生后，触发导通相应桥臂上的双向晶闸管 TRn，使得直流母线电容、双向晶闸管、快速熔丝、功率器件形成回路，利用直流母线电容储能熔断快速熔丝，将故障相隔离。同时将三相六开关的 APF 补偿模式切换到三相四开关补偿模式。具体容错切换原理如图 2 所示。图中：PWM 表示脉宽调制。

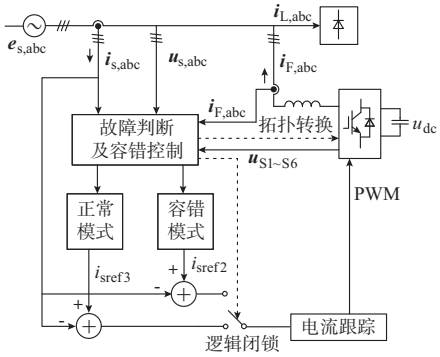

图 2　APF 容错切换策略
Fig.2　APF fault tolerant control strategy

在 APF 容错控制切换过程中，需要解决两个关键问题，一是如何保证切换过程的平滑过渡；二是如何保证切换到三相四开关容错模式后，APF 以最佳性能工作。

针对问题 1，为了实现两种 APF 拓扑的平滑切换，同时尽量减少对原系统硬件的影响，使得切换控制简单易行，必须选择适当的 APF 补偿策略。针对问题 2，必须针对三相四开关 APF 的控制性能及特殊要求设置相应的控制策略。

2　容错型 APF 补偿策略

2.1　两类补偿策略

并联型 APF 控制的根本目的在于通过合适的控制策略，借助 APF 的补偿作用，使得电源电流中不再包含谐波和无功成分。按其补偿实现方法，分为两类。

一类借助谐波检测算法，分离谐波和无功成分，控制 APF 输出相反电流，进而把非线性负载的网侧馈线电流补偿为基波(正序)有功电流。这是一种经典的补偿目标，现有 APF 大多采用此方式[4]。这类方法中，根据补偿目标的不同，可对单次、多次或全部谐波电流、无功功率和不平衡电流进行补偿，因此谐波检测算法的有效性直接影响 APF 的补偿性能。

常用的谐波检测算法大体可分为以下几类：①基于频谱分析模拟实现的带通、带阻滤波器或陷波器检测法，因误差大，已极少有；②基于频谱分析的离散傅里叶变换检测法[5]，可消除指定谐波，但计算量大，有较大时延；③基于 Fryze 时序分析的有功电流检测法[6]，将负载电流分解为正交的有功电流分量和广义无功电流分量，缺点是必须计算负载的有功功率和电网电压有效值，且不适合频繁变化负载的补偿；④基于瞬时无功功率理论的检测方法，以

p-q 法、i_p-i_q 法和 d-q 法及各种改进方法为代表[7],其电流检测的有效性很大程度上受滤波器性能好坏的影响;⑤其他方法,如自适应检测法、神经网络控制法等。

上述谐波检测算法中,又可分为基波提取法和谐波直接提取法,方法 1 和 4 均属基波提取法,从非线性负载电流 i_L 中提出基波正序分量 i_{Lf},使 APF 电流 i_F 等于 i_L-i_{Lf}作为补偿指令;方法 2 和 3 属谐波直接提取法,从负载电流中直接提取需要补偿的谐波 i_{Lh}、无功分量和不平衡分量。

第 2 类是不检测谐波的直接补偿方法。其控制的目标是将非线性负载网侧馈线电流波形与馈线电压波形一致,实现单位功率因数,以单周控制为代表[8]。

两种补偿策略本质是相同的,第 2 类策略是将非线性负载补偿为线性负载,解决了负载的本质问题。而第 1 类策略重视的是电源输出基波正弦电流的结果,然而在电网电压存在畸变的情况下,采用该方式强行将电源电流补偿为基波电流,则是将一种非线性负载补偿为另一种非线性负载。

2.2 两类补偿策略的关系

若电网电压不存在畸变,两类补偿策略具有等价性,其等效关系如图 3 所示。图中:PLL 表示锁相环;PI 表示比例-积分。

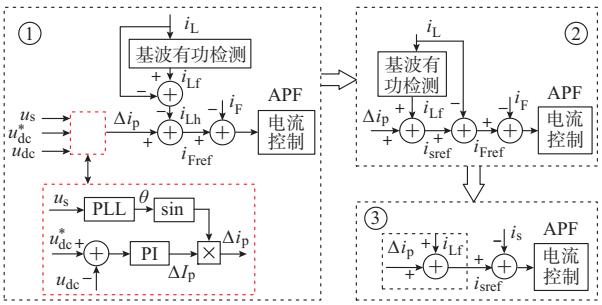

图 3 两种补偿方法关系

Fig.3 Relationship between two compensation methods

图 3 中①为基于谐波检测的典型 APF 补偿原理,可使用基波提取法或谐波直接提取法,获得 APF 补偿电流指令 $i_{Fref}=i_{Lh}=i_L-i_{Lf}$,再通过 APF 电流闭环控制,输出与负载谐波相反的分量,从而达到补偿效果。红色点线框内为 APF 直流电压外环,其闭环产生的有功电流 Δi_p 用以弥补损耗对 APF 直流侧电压的影响,维持直流侧电压 u_{dc}稳定。改变基波电流 i_{Lf}输出位置,可变换成图 3 中②的形式,其中 $i_{sref}=\Delta i_p+i_{Lf}$即为电源电流参考值。又因电源电流 $i_s=i_L+i_F$,故 APF 补偿原理又表示为图 3 中③的形式;而③的控制,即是控制电源电流跟踪电网电压,旋即变为第 2 类补偿策略。

下面从实现角度分析两种策略的特点。在谐波检测补偿算法中,补偿性能取决于谐波检测算法的准确性和快速性,然而谐波检测单元终非理想,总存在过渡过程和误差,由此引起 APF 补偿误差;而高精度检测算法实现较为复杂,且往往对硬件提出较高的要求;这些因素往往不利于 APF 容错切换控制的实现。

相对于谐波电流检测的 APF 补偿算法,第 2 类补偿方法具有如下特点:①控制检测电流传感器减少一半,由于不检测谐波,补偿控制只需配置电源三相相电流检测传感器;②谐波检测方案要求处理器具备快速处理能力,以分离瞬时谐波电流进行补偿;电源电流检测方案省去了谐波和无功功率计算环节,对处理器的要求较低,实现更为简单可靠,便于应用;③电源电流跟踪把 APF 输出、谐波电流均视为内环的扰动,闭环控制可有效抑制该干扰。

从硬件要求最少、实现较为简单可靠、同时便于切换的原则,本文在容错型 APF 控制上,采用基于电源电流直接跟踪的 APF 补偿策略。相对于单周控制,实现更为简单,其补偿原理如图 4 所示(以单相为例)。

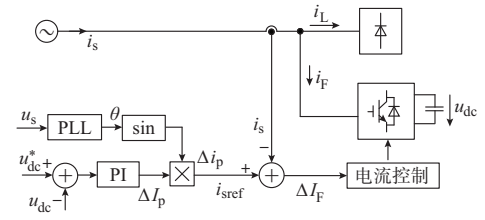

图 4 电源电流跟踪的 APF 补偿原理

Fig.4 Source current tracking compensation for APF

图 4 中电源电流指令相位通过三相软件 PLL 跟踪电网电压实现,指令电流幅值 Δi_p 通过直流母线电压外环产生,用以维持其直流母线电压稳定;若 APF 直流侧配置的是储能装置,则可在 APF 电能质量补偿的同时,通过调节指令电流幅值,增加 APF 输出有功调节能力。

在电源电流直接跟踪的容错型 APF 补偿策略中,电源电流的闭环跟踪精度和速度直接影响了 APF 的补偿精度。目前应用较多的电流跟踪技术包括三角载波比较 PWM[9]、滞环比较[10]、滑模控制、空间矢量脉宽调制[11]、单周控制、无差拍控制,以及模糊控制[12]等。本文应用硬件电路实现的滞环比较电流跟踪控制,可较好地完成电流快速跟踪要求。

3 三相四开关 APF 特性

3.1 四开关逆变器控制规律

容错型 APF 控制的关键在于故障后如何控制

四开关逆变器实现准确的电流控制。三相四开关拓扑等效于六开关拓扑的根本原因在于，三相六开关逆变器工作在三相三线制电路中，逆变器输出三相相电流之和均为零。只要控制任意两相电流，则第三相自然受控。

由图 1 可得四开关 APF 输出电流 i_{Fk} 关系为：

$$L_F \frac{di_{Fk}}{dt} = e_{sk} - Ri_{Fk} - (u_{kn} - u_{n0}) \tag{1}$$

式中：k 取 a，b，c；L_F 为 APF 输出电感；e_{sk} 为 APF 接入点电压；R 为线路电阻；$u_{k0} = u_{kn} - u_{n0}$ 表示四开关逆变器输出相电压。

重新定义开关函数 s_a，s_b，当其为 1 时表示对应相上桥臂开通而下桥臂阻断，为 −1 时相反。这样可控相 A，B 上的输出线电压 $u_{an} = 0.5 s_a u_{dc}$，$u_{bn} = 0.5 s_b u_{dc}$，再根据三相电压和电流的耦合关系，解得 $u_{n0} = 1/6(s_a + s_b) u_{dc}$，将其代入式(1)，并重写成矩阵形式：

$$\begin{cases} p\begin{bmatrix} i_{Fa} \\ i_{Fb} \end{bmatrix} = \dfrac{1}{L_F}\begin{bmatrix} e_{sa} \\ e_{sb} \end{bmatrix} - \dfrac{R}{L_F}\begin{bmatrix} i_{Fa} \\ i_{Fb} \end{bmatrix} - \\ \qquad \dfrac{1}{6L_F} u_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} s_a \\ s_b \end{bmatrix} \\ i_{Fc} = -i_{Fa} - i_{Fb} \end{cases} \tag{2}$$

式中：p 为微分算子。

可见三相四开关拓扑中，只需对两相开关函数 s_a，s_b 进行准确调制，即可实现三相输出电流的控制。需要注意，同样调制度下，四开关 APF 的直流电压利用率低于六开关 APF，因此在容错型 APF 控制中，需要适当地提高直流电压等级。而针对由此引起的器件耐压问题，可通过并网侧配置隔离升压变压器或未来拟采用多电平技术加以有效解决；而目前的容错控制中，为了保证器件的安全耐压，通常采取的措施包括过调制技术提高直流电压利用率，以及适当降低直流电压提升程度，以牺牲部分补偿性能为代价，保证 APF 装置的安全容错运行。

3.2　直流中点偏移问题

上述对四开关 APF 逆变器工作原理的分析均建立在不考虑直流中点偏移的基础上。然而四开关变换器电容桥臂上因流过交流负载电流，会引起直流母线中点的瞬时偏移，下面分析其影响。设串联电容 C_1 和 C_2 电流分别为 i_{c1} 和 i_{c2}，由图 1 可得：

$$\begin{cases} (s_a i_{Fa} + s_b i_{Fb} + i_{c1}) - i_{dc} = 0 \\ (s_a i_{Fa} + s_b i_{Fb} - i_{c2}) + i_{dc} = 0 \\ i_{Fc} = i_{c2} - i_{c1} \end{cases} \tag{3}$$

式中：i_{dc} 为直流侧电流。

从中解得：

$$\begin{cases} i_{c1} = C_1 \dfrac{du_{c1}}{dt} = -s_a i_{Fa} - s_b i_{Fb} - \dfrac{1}{2} i_{Fc} \\ i_{c2} = C_2 \dfrac{du_{c2}}{dt} = -s_a i_{Fa} - s_b i_{Fb} + \dfrac{1}{2} i_{Fc} \end{cases} \tag{4}$$

可以看到，电容上将流过负载电流成分，对其积分可得电容电压，电容电压上亦有交流纹波；即使电容参数完全匹配 $C_1 = C_2$，也只能保证串联电容的电压平均值相等，而瞬时值存在差异。设电容电压差异分别为 $u_{c1} = 1/2 u_{dc} + \Delta u$，$u_{c2} = 1/2 u_{dc} - \Delta u$，将其代入逆变器输出三相相电压，可得

$$\begin{bmatrix} u_{an} \\ u_{bn} \\ u_{cn} \end{bmatrix} = \frac{u_{dc}}{3}\begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \\ 2 & -1 & -1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} s_a \\ s_b \\ \frac{1}{2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} \\ -\frac{2}{3} \end{bmatrix} \Delta u \tag{5}$$

可见，直流母线中点电压的偏移破坏了三相输出电压的平衡，势必造成输出电流的失衡，进而影响 APF 实际补偿效果。

3.3　电压前馈补偿方法

针对上述四开关逆变器上述特点，本文提出具有直流中点电位平衡补偿功能的电源电流跟踪 APF 控制方法，如图 5 所示。

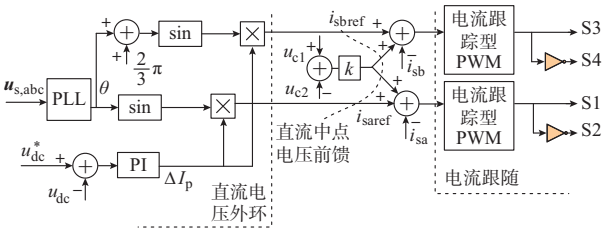

图 5　电压前馈补偿的四开关 APF 实现方法
Fig.5　Implement for four-switch APF with voltage feed-forward compensation

仍假设 C 相故障，其中 i_{saref} 和 i_{sbref} 为电源电流给定值，是电压外环输出幅值与电源两相电压锁相波形的乘积；i_{sa}，i_{sb} 为电源电流反馈；电流控制采用滞环电流跟踪方式。为了补偿直流母线中点电位偏移，本文提出了直流中点电压前馈的补偿算法：检测直流母线电容电压差值 $\Delta u = 0.5(u_{c1} - u_{c2})$，根据式(5)，在电流参考值中加入 $(1/3)\Delta u$ 作为前馈，就可补偿因电容电压瞬时值差异造成的直流中点电位偏移，图 5 中，$k = 1/6$。

4　容错型 APF 实现关键技术

4.1　容错型 APF 无缝切换

为了实现两种 APF 的无缝切换，同时尽量减少

对原系统硬件的影响和冲击,使得切换控制尽量简单易行,本文中容错前后 APF 控制策略,均采用电源电流直接跟踪方式,保持了算法的一致性;一旦故障检测环节检测到单一故障相开路故障,采取如下的措施进行切换:①触发故障相双向晶闸管 TRn;②对故障相功率器件开关信号进行闭锁;③调整直流电压基准;④投入四开关直流中点电位平衡补偿算法。具体方法如图 6 所示。

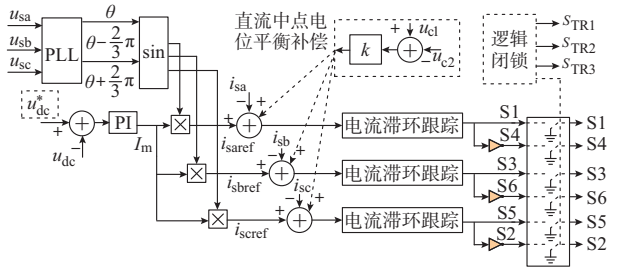

图 6 容错型 APF 切换方法

Fig.6 Switching method for fault-tolerant APF

由于切换过程中,仅是对电源电流指令的改变,因此保持了原控制系统的一致性,最大限度地减少了切换过程中的冲击。

4.2 电流滞环比较跟踪控制

为了实现快速、准确的电流跟踪,本文设计了硬件实现的电流滞环跟踪电路(仍以 C 相开路为例),见附录 A 图 A1。

电流滞环比较跟踪控制电路由三个模块组成:①经数字信号处理器(DSP)电压外环和锁相处理得到的电源两相参考电流信号 i_{saref} 和 i_{sbref},再经 TLV5617A 串行数/模(D/A)转换器得到电压形式的电源电流指令 IREFA 和 IREFB;②电流滞环比较模块。参考电流指令 IREF 与实际电流指令 IFB 产生电流偏差与设定的电流滞环宽度进行比较,用于产生控制所需 PWM 信号;其中 IFBA,IFBB 分别为 A,B 两相反馈电流指令,上下滞环宽度可通过电阻的分压分别确定;③脉冲形成与死区闭锁模块。滞环输出的信号 RA,SA,RB,SB 经 GAL22V10 组成的可编程逻辑阵列处理,形成具有死区控制的两路脉冲信号,用于驱动三相四开关 APF 的两路桥臂,其中死区时间由配置的电阻和电容充放电时间等决定。

为了提高锁相精度和响应速度,APF 锁相环节采用基于瞬时无功功率理论的三相软件 PLL 实现。

5 试验验证

为了验证四开关容错型 APF 的控制效果,本文建立了小功率的三相四开关 APF 实验装置。直流电压 $u_{dc}=30$ V,交流电压峰值 e_s 为 5 V,经隔离升压接入电网,辅助桥臂上电容 $C_1=C_2=2\ 200\ \mu$F,输出电感 $L_F=1.8$ mH;非线性负载为三相整流硅堆驱动 6 Ω 电阻负载;控制及加载系统如附录 A 图 A2 所示。采用电源电流直接跟踪补偿算法,电流控制基于滞环电流跟踪方式,滞环宽度 $h=0.12$ A。其中 APF 电流测量系数为 0.2,电源电流变比为 0.02,直流电压变比为 0.02。

5.1 电源电流跟踪补偿效果

附录 A 图 A3 为采用上述策略的控制效果。其中图 A3(a)为三相四开关容错型 APF 启动瞬时 A 相的控制效果。图 A3(b)为四开关 APF 输出三相补偿电流。

可见,即使不检测谐波,在电源电流跟踪的控制策略下,三相四开关 APF 也能很好地实现对电能质量的控制。对于电源而言,其输出电压、电流波形一致,功率因数为 1,只提供负载有功功率,负载中的谐波和无功成分完全由 APF 补偿,相当于将非线性负载补偿等效为电阻。

5.2 直流中点电位偏移及抑制

根据前文分析,直流母线的中点偏移将严重影响容错型四开关 APF 的补偿效果。附录 A 图 A4(a)为未引入直流母线中点偏移前馈控制的 APF 调控效果。可以看到,电容 $u_{c1}=55$ V,$u_{c2}=25$ V,导致直流中点电位偏移 $\Delta u=15$ V。中点偏移导致局部电压畸变,进一步引起电感电流的突变,控制效果严重下降,无法满足系统补偿要求。加入直流中点前馈补偿后,图 A4(b)中直流电压偏移 Δu 基本为零,波形恢复正常。

5.3 APF 有功功率控制

为提升 APF 补偿能力,直流侧配置蓄电池储能,使之同时具备有功调节能力。借助电压外环控制,在储能的作用下,除了对负载谐波进行有效抑制,还可实现有功功率的调控。控制效果如附录 A 图 A5 所示。

图 A5 (a)中电压调节器输出电流参考幅值为 0.5 A,此时 APF 对外向负载提供部分有功功率,该有功功率由直流侧蓄电池储能提供,此时电流电源中的谐波和无功成分被完全补偿,因此补偿后,电源输出基波成分相应减小;图 A5(b)中,电压调节器输出电流参考幅值 i_{sref} 为 1.5 A,即要求电源输出正序基波电流 i_{sa} 超过负载所需要的电流基波电流 i_{Lf}(1 A),此时 APF 吸收多余的有功功率向直流侧

储能充电。

6　结论

1）三相四开关 APF 分析的模型，通常都建立在直流母线电容中点电压平衡的基础上，本文提出的直流母线中点电压差值前馈补偿算法，可有效抑制此不平衡对补偿性能的影响。

2）基于电源电流跟踪的 APF 补偿策略，可简化容错系统方案，且不影响补偿精度，易于容错切换的实现。

3）电流跟踪能力直接决定 APF 补偿性能，宜采用快速、高精度的电流跟踪方式，如滞环电流跟踪、单周控制等。

4）准确的故障诊断方法是 APF 容错控制的前提，宜开发新型可靠的故障诊断方法。

5）直流侧配置储能后，基于电源电流控制的 APF 补偿策略，在谐波和无功补偿基础上，同时具备有功调节能力。

附录见本刊网络版（http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx）。

参考文献

[1] 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.

[2] 胡文祥，程明，朱孝勇，等.驱动用微特电机及其控制系统的可靠性技术研究综述[J].电工技术学报，2007，22(4)：38-46.
HU Wenxiang，CHENG Ming，ZHU Xiaoyong，et al. An overview of reliability of drive system for small and special electric machines [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2007，22(4)：38-46.

[3] 赵杰，张艳霞，宣文博，等.分布式电源中逆变器的故障特征和保护方案[J].电力系统自动化，2012，36(1)：51-54.
ZHAO Jie，ZHANG Yanxia，XUAN Wenbo，et al. Fault characteristics and protection scheme of distributed genera-tion inverters[J]. Automation of Electric Power Systems，2012，36(1)：51-54.

[4] 王广柱.有源电力滤波器两种补偿目标的分析和比较[J].中国电机工程学报，2007，27(9)：115-120.
WANG Guangzhu. Comparison between two types of compensation objectives active power filters[J]. Proceedings of the CSEE，2007，27(9)：115-120.

[5] 李建奇，罗安，汤赐，等.一种新型负序基波电流检测方法及其应用[J].电力系统自动化，2008，32(15)：71-74.
LI Jianqi，LUO An，TANG Ci，et al. A novel detecting method for negative sequence fundamental current and its applications [J]. Automation of Electric Power Systems，2008，32(15)：71-74.

[6] 黄宇淇，孙卓，姜新建，等.FBD 法及复合控制在有源滤波器中的应用[J].电力系统自动化，2006，30(7)：65-68.
HUANG Yuqi，SUN Zhuo，JIANG Xinjian，et al. Application of FBD method and composite control in active power filter[J]. Automation of Electric Power Systems，2006，30(7)：65-68.

[7] 王兆安，杨君，刘进军.谐波抑制与无功功率补偿[M].2 版.北京：机械工业出版社，2010.

[8] 李承，邹云屏.串联型有源电力滤波器的单周控制方法[J].电力系统自动化，2005，29(15)：49-52.
LI Cheng，ZOU Yunping. Series active power filter based on voltage-source inverter with one cycle control[J]. Automation of Electric Power Systems，2005，29(15)：49-52.

[9] 巫付专，万健如，沈虹.基于不同电流跟踪方式 APF 连接电感选取与设计[J].电力电子技术，2009，43(8)：7-9.
WU Fuzhuan，WAN Jianru，SHEN Hong. Selection and design of the inductance connected with APF based on different current tracking modes[J]. Power Electronics，2009，43(8)：7-9.

[10] 谭兴国，李庆民，王辉.电压不平衡情况下三相 4 开关并联型 APF 参考值[J].高电压技术，2012，38(11)：3101-3108.
TAN Xingguo，LI Qingmin，WANG Hui. Study on current reference generating strategy for three-phase four-switch APF under unbalanced voltage scenario [J]. High Voltage Engineering，2012，38(11)：3101-3108.

[11] 许晓彦，杨才建，MINDYKOWSKI Janusz.有源滤波器空间矢量脉宽调制电流跟踪算法的优化[J].电力系统自动化，2012，36(4)：80-84.
XU Xiaoyan，YANG Caijian，MINDYKOWSKI Janusz. Optimization on current tracking algorithm in active power filter based on SVPWM[J]. Automation of Electric Power Systems，2012，36(4)：80-84.

[12] 刘心旸，王杰，王昕，等.有源滤波器的模糊阈值变环宽滞环电流跟踪控制策略[J].电力系统保护与控制，2011，39(11)：116-123.
LIU Xinyang，WANG Jie，WANG Xin，et al. A fuzzy threshold mutative bandwidth hysteresis current tracking control method for active power filter[J]. Power System Protection and Control，2011，39(11)：116-123.

谭兴国（1981—），男，通信作者，博士研究生，讲师，主要研究方向：电力电子在电力系统中的应用、电能质量控制。E-mail：tanxingguo1981@126.com

王　辉（1974—），女，博士，副教授，主要研究方向：大功率电力电子技术、新能源与分布式发电技术。E-mail：sddluh@sdu.edu.cn

张　黎（1979—），男，博士，讲师，主要研究方向：新能源技术以及电力电子技术。E-mail：zhlieee@gmail.com

（编辑　孔丽蓓）

（下转第 135 页　continued on page 135）

(上接第 104 页　continued from page 104)

Fault-tolerant Active Power Filter Based on Three-phase Four-switch Topology and Its Control Strategy

TAN Xingguo[1,2], *WANG Hui*[2], *ZHANG Li*[2], *LI Qingmin*[2]

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;
2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The active power filter (APF) is usually based on three-phase six-switch topology. In order to improve its reliability, a three-phase four-switch redundancy fault-tolerant APF topology is proposed. For an open-circuit fault in the three-phase six-switch APF, a fault identification method based on power device voltage change is proposed. By studying the relation between harmonic detection APF compensation algorithm and supply current tracking APF compensation algorithm, it is pointed out that the latter is more suitable for fault-tolerant APF application. Based on the mathematical model of three-phase four-switch APF, a direct current (DC) bus midpoint voltage feed-forward compensation algorithm is presented to compensate for the side-effect on output imbalance; if energy storage is configured on the DC side, APF active power regulation is also available. The APF fault tolerant switching control strategy is proposed. Based on a three-phase four-switch APF platform, the effectiveness of the proposed method is verified by experiment.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51107068), Open Fund of Key Laboratory of Control Engineering of Henan Province (No. KG2014-14) and State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (No. LAPS13017).

Key words: active power filter (APF); three-phase four-switch; voltage feed-forward control; fault-tolerant; direct current (DC) midpoint bias; harmonic detection