级联型STATCOM容错控制研究与应用

为保证级联型STATCOM的高可靠运行，在对装置故障点准确定位的前提下，采用“*N*+1级”硬件冗余结合软件冗余解决装置的容错运行难题。提出具有容错控制功能的装置相间/相内直流侧电容电压平衡控制策略以及PWM调制策略，在IGBT开路故障时禁用驱动脉冲并通过旁路电路隔离故障模块，最终实现装置的容错运行。通过实验证明采用容错控制策略不但具有良好的动态补偿效果，而且有较快的容错控制响应速度。

夏正龙／江苏师范大学电气工程与自动化学院
杨晓冬／盐城工学院电气工程学院

夏正龙／讲师

关键词/Keywords
级联型STATCOM·
容错控制·
研究应用·

0　引言

级联型STATCOM在供配电系统无功补偿与谐波治理领域具有突出优点：各级联H桥单元按模块化思想设计、直流侧电容相互独立、装置等效开关频率高且易于实现大补偿容量与高电压，目前级联型STATCOM的应用已经越来越广泛[1-3]。由于功率开关器件短路故障最终也转化为开路故障[4]，因此本文侧重研究级联型STATCOM内部功率开关器件开路故障的容错控制。目前，变流器容错控制主要采用故障隔离、冗余设计、容错拓扑结构[5-6]以及容错控制策略四种方法。

本文针对级联型STATCOM如何提高容错运行能力问题，结合硬件冗余方法与软件冗余方法，提出一种具备容错运行能力的级联型STATCOM容错控制策略，从根本上解决该类装置容错运行问题。

1　装置故障影响机制

级联型STATCOM控制主要包括电流跟踪处理、电容电压的均衡控制、滤波器的解耦与阻尼控制以及PWM调制，总体控制结构如图1所示。

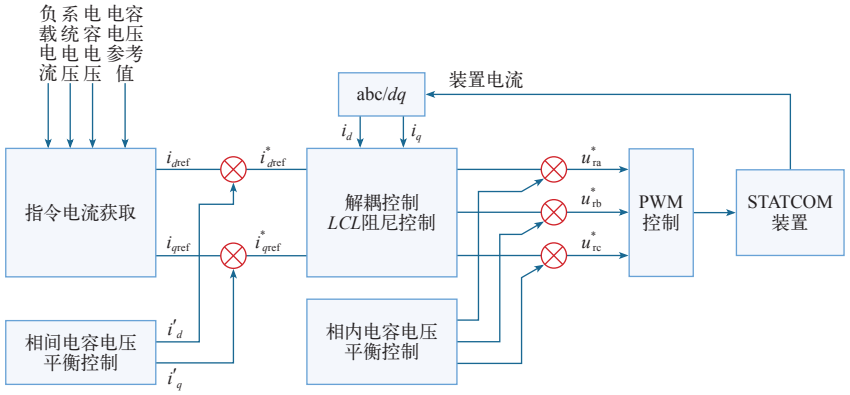

图1　级联型STATCOM控制结构

指令电流主要包括两部分：有功电流指令与无功电流指令。有功电流指令基波成分主要通过PI控制实现向级联型STATCOM提供有功消耗；有功电流指令高频部分与基波部分累加作为有功电流指令值i_{dref}；无功电流指令值i_{qref}则通过3s/2r转换、锁相处理环节得到，结构如

高等学校博士学科点专项科研基金（20110095110014），江苏师范大学校科研基金（14XLR017）。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

图2所示。

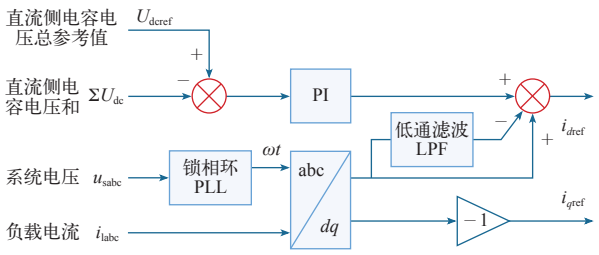

图2 装置指令电流计算框图

本文研究的级联型STATCOM对象电压为6 kV，容量为2.4 Mvar，链节单元数为8，正常工况下电容电压指令值设为700 V。为保证装置补偿电压大小，在功率开关器件开路故障后，故障相电容电压指令跃升至800 V，目的是保证每一相的电容电压之和保持不变，因此故障后指令电流处理环节无须调整。

电容电压均衡控制包括三部分：总体均衡控制、相内均衡控制以及相间均衡控制。总体均衡控制着眼于各相内的H桥链节单元的电容电压平均值的无静差控制。故障发生后导致故障相内实际运行功率模块减少，使得相内与相间电容电压平衡被打破，需要进行控制策略上的调整。

本文控制对象采用载波移相调制方法，其载波数与移相角都与级联数目有关，当故障发生后，相应的PWM调制方法必须进行调整，否则不能保证装置补偿电压的质量。

2 电容电压均衡控制的容错机理

级联型STATCOM中H桥单元直流侧电容电压的均衡控制一方面从硬件上保证同厂同批次；另一方面软件上对电容电压均衡控制策略进行优化，以调节各模块直流侧电容的充放电，使之电压趋于平衡。

2.1 电容电压相间均衡的容错控制策略

本文电容电压相间均衡控制采用指令电流叠加电流控制量方法。设$\bar{U}_{dc}$为级联型STATCOM所有电容电压的平均值，$\bar{U}_{dca}$、$\bar{U}_{dcb}$和$\bar{U}_{dcc}$为各相电容电压的平均值，以电容电压偏差进行PI调节，再将其转换为互成2π/3交流量后，再进行abc/dq变换得到i'_d与i'_q，最终叠加至指令电流，如图3所示。

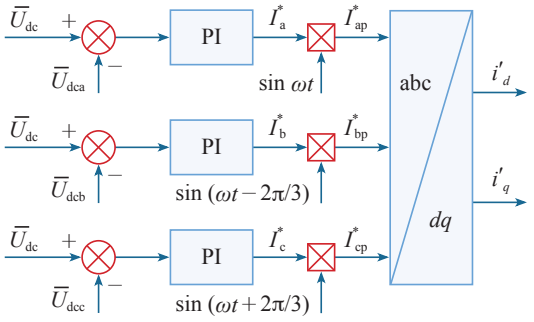

图3 正常工况下相间电容电压平衡控制

装置发生故障后，链节数量改变，为保证补偿电压幅值，故障相电容电压的设定值需要抬升，因此相间平衡控制环节的输入改变。故障相输入调整为故障相电容电压的参考平均值，不参与电容电压的相间平衡控制；非故障相输入为非故障相的电容电压平均值，即参与非故障相之间电容电压的相间平衡控制，需要引入故障容错功能的电容电压的平均值运算和分配模块，控制框图如图4所示。

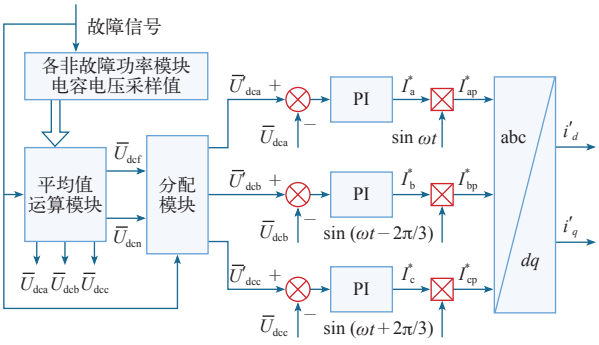

图4 具有容错功能的相间电容电压平衡控制

2.2 电容电压相内均衡的容错控制策略

U_{dcam}为A相第m链节直流侧电容电压，以该电压与A相电容电压均值的偏差进行PI调节，转变为交流量得到A相第m链节相内补偿电压，进而叠加至A相调制波。当故障发生后，故障相的电容电压平均值计算发生变化，需要引入带故障容错功能的平均值运算模块，如图5所示。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

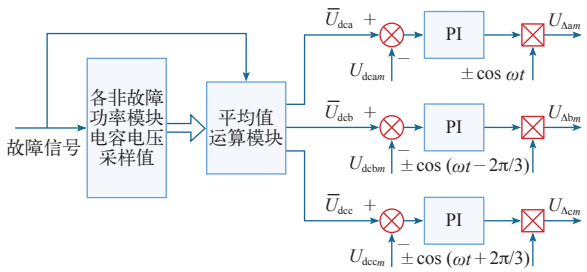

图5 具有容错功能的相内电容电压平衡控制

3 具有容错功能的PWM控制策略

故障发生前，相邻两个链节的采样间隔为T_s，当某链节开关器件发生故障并旁路后，其相邻链节采样间隔变为2T_s，其余正常模块采样间隔不变，由于采样间隔不一致，会导致级联型STATCOM补偿电压质量降低，因此必须对PWM调制策略进行调整，保证非故障链节间的采样间隔保持一致。装置的采样周期不允许改变，只能对三角载波周期进行调整，可调整为$T_c'=T_c(N+1-m)/(N+1)$，m为故障模块的数量，当$m=1$时，调整后的脉冲时序如图6所示。

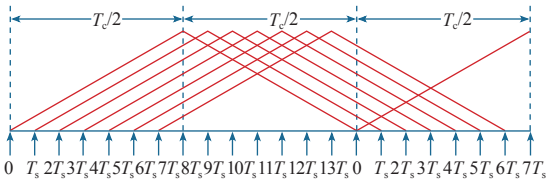

图6 调整载波周期后链节脉冲时序图

4 实验验证

级联型STATCOM各链节直流侧电容需要通过电网进行充电，主要分为两个过程：①主电路经软起电阻对直流侧电容进行充电；②待电容电压达到预设定值后将软起电阻旁路，解除IGBT封锁信号，开放PWM，电压控制环开始起作用，装置在PWM整流状态下继续对各直流电容充电，电容电压继续升高，直至升高到最终设定值，控制软起过程结束。整个过程仅需30 s左右，对电网冲击较小。

图7为实验平台结构示意图，一台为补偿机，一台为负载机。图7中，i_s为系统电流；i_l为负载电流；i_c为滤波后装置电流；i_{c1}为滤波前装置电流；i_f为滤波支路电流。

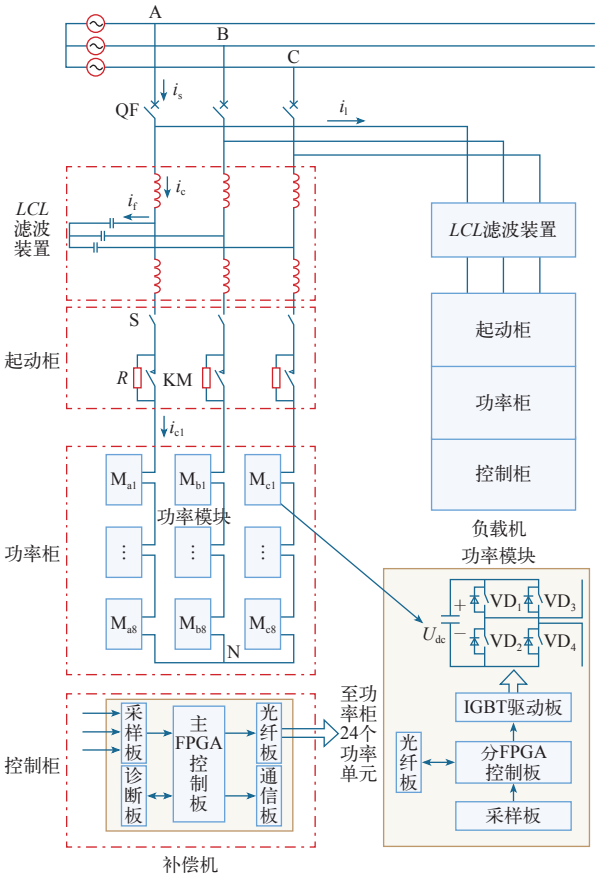

图7 实验平台总体结构

装置故障信号由外部开关点模拟，当外部旋钮至“故障模拟位”即代表故障发生，主FPGA控制器收到外部输入信号后执行容错控制程序，以A1模块故障为例，工作流程如图8所示。

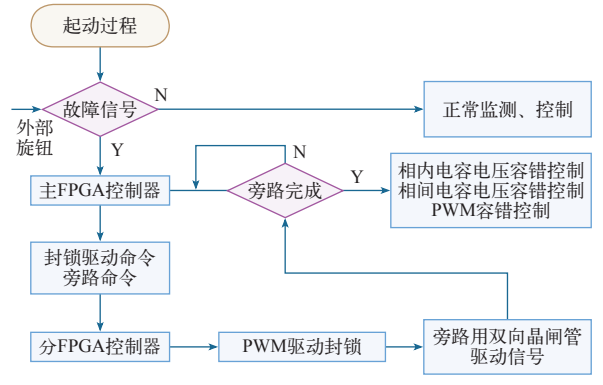

图8 容错控制流程框图

容错控制投入前后级联型STATCOM输出电压波形如图9、图10所示，投入容错控制功能后，装

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

置输出电压电平由17电平变为15电平，最高电平处持续时间变长。

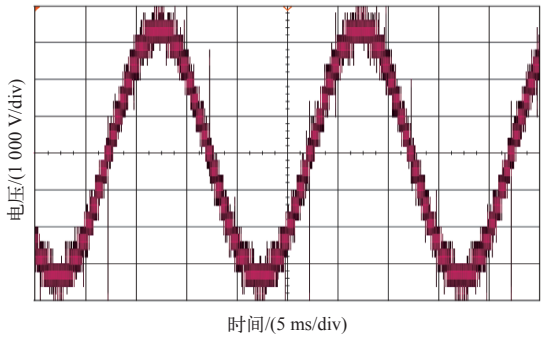

图9　正常情况下单相输出电压波形

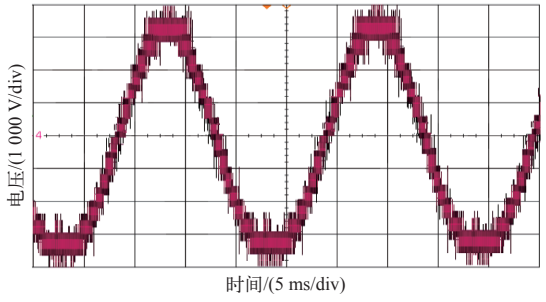

图10　容错控制下输出电压波形

容错控制投入前后A相中所有链节直流侧电容电压上位机记录波形如图11所示。投入容错控制策略后，非故障链节的电容电压由700 V抬升至800 V并保持稳定，B、C两相的电容电压不受影响。

5　结束语

本文采用带一级冗余的硬件冗余方法结合软件冗余方法，将需要进行容错控制处理的相间/相内电容电压平衡控制策略以及PWM调制策略纳入控制框架，实验结果证明该方法能有效解决级联型STATCOM的容错控制问题。

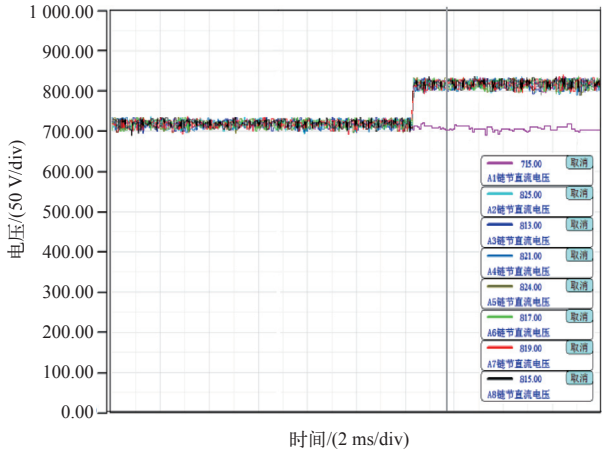

图11　容错控制下A相电容电压上位机曲线图

参考文献

[1] 张茂松，查晓明，孙建军，等．链式D－STATCOM的无源性控制 [J]．中国电机工程学报，2011，31 (15)：33-39．

[2] 陈丽兵，史丽萍，夏正龙，等．基于同步旋转变换及DFT的SVG指令电流检测法 [J]．电力系统保护与控制，2014，42 (13)：21-27．

[3] 常伟，史丽萍，王思捷，等．空间矢量调制技术在6 kV级联静止同步补偿器中的应用 [J]．电力系统保护与控制，2012，40 (12)：95-99．

[4] 安群涛，孙力，赵克，等．基于开关函数模型的逆变器开路故障诊断方法 [J]．中国电机工程学报，2010，30 (6)：1-6．

[5] 连霄壤．模块化多电平STATCOM控制策略研究 [D]．杭州：浙江大学，2012．

[6] 连霄壤，江道灼．基于模块多电平的静止无功补偿器故障容错控制 [J]．电力系统保护与控制，2012，40 (16)：83-89．

（收稿日期：2015－03－27）EA

欢迎订阅　欢迎投稿　欢迎刊登广告

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net