## 链式STATCOM冗余容错过程的开关暂态分析

张 扬<sup>1,2</sup>,万安平<sup>3</sup>,邓才波<sup>2</sup>,林卫星<sup>4</sup> (1. 南昌工程学院 机械与电气工程学院,江西 南昌 330099; 2. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院,江西 南昌 330096; 3. 浙江大学 机械工程学院,浙江 杭州 310027; 4. 特变电工新疆新能源股份有限公司,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:功率模块的冗余容错控制对链式静止同步补偿器(STATCOM)可靠性的提高非常关键。冗余容错包括 故障容错和异常容错2种,而目前多采用理想模型来描述系统冗余容错过程,不能很好地体现这2种情况中 的开关暂态过程。提出了一种电路等效模型,综合考虑了接触器励磁回路、电弧放电等因素的影响,建立冗 余容错过程中的开关暂态数学模型,并通过理论分析和试验对比理想模型和所提模型。对比结果表明,所提 模型可以更准确地描述系统冗余容错过程中的开关暂态过程。

关键词:冗余容错;等效模型;链式STATCOM;暂态分析;旁路开关 中图分类号:TM 761<sup>+</sup>.1

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202101017

#### 0 引言

链式静止同步补偿器(STATCOM)是采用级联 多电平结构的大功率电力电子变换器,它将H桥功 率模块首尾相连构成换流链,以耐受更高的电压并 获得更大的容量<sup>[1]</sup>。链式 STATCOM 是新能源发电、 特高压直流输电系统等工业领域的重要电能质量调 节设备,具有响应速度快、控制性能好等优点[24]。 制约链式 STATCOM 发展的主要因素是可靠性<sup>[5-6]</sup>, 其容易在功率模块故障时跳闸。提高可靠性的关键 是保证功率模块故障时不停电。

在故障过程中,链式 STATCOM 可以采用冗余 容错方式提高可靠性<sup>[7]</sup>,当H桥功率模块发生故障 时,设备迅速闭合旁路开关,切除该故障功率模块, 从而使得换流链其他部分隔离故障。检修维护时, 采用带电操作,将故障器件替换掉,断开旁路开关恢 复正常运行。旁路开关主要有交流接触器和电子式 开关2种[8-10]。交流接触器工作可靠、动作较迅速 (动作时间最快为数毫秒)、维护方便,因此工业现场 多选择交流接触器作为旁路开关。

#### 收稿日期:2020-07-10;修回日期:2020-11-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51867019);中国博士 后基金资助项目(2019M652278);江西省博士后择优资助项 目(2018KY13);江西省教育厅科技项目(GJJ180961);陕西 省重点研发计划项目(2017ZDXM-GY-135)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51867019), China Postdoctoral Fund Project (2019M652278), Jiangxi Postdoctoral Selection Funding Project(2018KY13), the Science and Technology Project of Jiangxi Provincial Department of Education (GJJ180961) and the Key Research and Development Plan of Shaanxi Province (2017ZDXM-GY-135)

冗余容错按照原因分类,可分为故障容错和异 常容错两大类。故障容错是指发生了真实故障,旁 路开关闭合而冗余容错,这时旁路开关起到了隔离 故障的作用;异常容错是指没有发生真实故障,旁路 开关触头放电引起的冗余容错。链式 STATCOM 中 采用的旁路开关是快速开关,动作时间在10ms以 内,触头距离较短(一般为2mm以内),易发生异常 放电。现有技术条件下,无法完全避免这类异常放 电现象。

目前,冗余容错主要集中在控制保护策略、旁路 开关等技术的研究。文献[11]对链式 STATCOM 的 暂态调制比、传递函数等开展研究,提出新型动态虚 拟阻抗技术改善其暂态响应。文献[12]研究了链式 STATCOM 的功率模块冗余方案,通过提高直流电压 来维持冗余恢复稳态后的调制度,三角载波根据剩 余模块进行周期调整。文献[13]利用了零序电压来 优化链式STATCOM的冗余暂态过程。然而以上研 究都是以H桥的理想模型为基础进行的,暂态过程 被忽略,各种暂态现象无法复现。这会造成参数选 型、保护设计缺乏足够的依据。因此,需要一种更精 确的电路模型为仿真和实践提供指导。

本文提出了一种可复现开关暂态过程的H桥电 路等效模型,综合考虑了励磁回路、电弧放电等因素 的影响:分析了故障容错和异常容错2种冗余容错 方式对链式STATCOM的影响机理;并设计3种试验 和仿真来对比理想模型和所提等效模型。

#### 1 链式STATCOM的H桥功率模块的模型

#### 1.1 电路模型

链式STATCOM的电路如图1所示,每条换流链 由可旁路的H桥功率模块串联而成。图中,i<sub>r</sub>(r=ab,

bc,ca)为第r条换流链的电流; $u_{c,r}$ 为第r条换流链的 交流电压; $u_{s,r}$ 为第r条换流链的网侧电压; $u_{dej,r}$ 为第r 条换流链第j个功率模块的直流电压;L为平波电抗 器电感; $C_0$ 为功率模块的直流电容;G为电弧电导。 实际中的接触器动作存在一系列电磁变化过程,本 文采用的接触器等效模型如图1(b)中所示,将接触 器等效为二元选择开关。接触器分闸时可能出现单 向电弧,因此用带二极管的Mayr电流源模型等效; 合闸时考虑了开关自身的寄生电容 $C_{\Delta}$ 和分布电阻  $R_{cua}$ 。接触器的励磁回路单独进行建模,其中 $u_{f}$ 为励磁回路电压, $R_{f}$ 为励磁回路电阻, $L_{f}$ 为励磁回路电感,  $i_{f}$ 为励磁回路电流。



#### 图1 链式STATCOM的电路

#### Fig.1 Circuit of cascaded STATCOM

#### 1.2 接触器的数学模型

接触器的励磁回路<sup>[14-16]</sup>用于产生磁场来吸引动 铁芯运动,从而控制合分闸。在触动阶段和运动过 程中,磁场的电压平衡方程可以写成如下形式:

$$u_{\rm f} = i_{\rm f} R_{\rm f} + N \frac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}t} = i_{\rm f} R_{\rm f} + N \frac{\mathrm{d}(L_{\rm f}i_{\rm f})}{\mathrm{d}t} = i_{\rm f} R_{\rm f} + N L_{\rm f} \frac{\mathrm{d}i_{\rm f}}{\mathrm{d}t} + N i_{\rm f} \frac{\mathrm{d}L_{\rm f}}{\mathrm{d}t}$$
(1)

其中,N为励磁匝数;ψ为磁通链。

运动过程中励磁回路也会变化,动铁芯速度*v* 和位移*x*的关系式为:

$$i_{\rm f} \frac{\mathrm{d}L_{\rm f}}{\mathrm{d}t} = i_{\rm f} \frac{\mathrm{d}L_{\rm f}}{\mathrm{d}x} \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = i_{\rm f} v \frac{\mathrm{d}L_{\rm f}}{\mathrm{d}x} \tag{2}$$

将式(2)代入式(1),可得:

$$u_{\rm f} = i_{\rm f} R_{\rm f} + N L_{\rm f} \frac{{\rm d}i_{\rm f}}{{\rm d}t} + N i_{\rm f} v \frac{{\rm d}L_{\rm f}}{{\rm d}x}$$
(3)

在运动过程中,v用平均值进行近似。为了化简方程,认为  $dL_f/dx$  和v是常数,并令  $K_1 = NL_f, K_2 = Nv dL_f/dx$ ,则式(3)变为:

$$K_1 \frac{\mathrm{d}i_\mathrm{f}}{\mathrm{d}t} = u_\mathrm{f} - i_\mathrm{f} R_\mathrm{f} - K_2 i_\mathrm{f} \tag{4}$$

考虑在触动阶段(持续时间小于1 ms),动铁芯 静止,即v=0,故式(4)等效为:

$$K_1 \frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{f}}}{\mathrm{d}t} = u_{\mathrm{f}} - i_{\mathrm{f}}R_{\mathrm{f}} \tag{5}$$

综合式(1)—(4),可以确定开关闭合的延时时间 $T_d = x/v_o$ 。

接触器触电出现故障时,会发生场发射效应,造成拉弧放电现象,Mayr方程的电弧电阻表达式为<sup>[17-20]</sup>:

$$\frac{1}{G}\frac{\mathrm{d}G}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{u_{\mathrm{arc}}i_{\mathrm{arc}}}{P_0} - 1 \right) \tag{6}$$

其中, τ 为电弧时间常数, u<sub>are</sub> 为电弧电压, i<sub>are</sub> 为电弧 电流, P<sub>0</sub> 为电弧消耗的功率, 均可认为是常数。

# 2 2种模型对链式 STATCOM 的开关暂态影 响分析

#### 2.1 链式STATCOM故障容错的影响分析

以图1(a)所示的链式STATCOM为例,可得:

$$u_{s,r} - u_{c,r} = L \frac{\mathrm{d}i_r}{\mathrm{d}t} \tag{7}$$

根据逆变电压与调制度的关系,则有:

$$u_{\rm c,r} = m \sin\left(\omega t + \varphi + \gamma_r\right) \sum_{j=1}^{N_{\rm m}} u_{\rm dcj,r} \tag{8}$$

其中,*m*为调制比; $\omega$ 为角频率; $\varphi$ 为控制角; $N_m$ 为换 流链模块数; $\gamma_r$ 为初相角,且 $\gamma_{ab}$ =0, $\gamma_{bc}$ =-2 $\pi/3$ , $\gamma_{ca}$ =2 $\pi/3$ 。

根据能量守恒定律,直流侧电容电压的方程可 以由能量关系得到,即:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \left( \sum_{r} \sum_{j} \frac{1}{2} C_0 u_{\mathrm{d}cj,r}^2(t) \right) = \sum_{r} \sum_{j=1}^{N_{\mathrm{m}}} \frac{C_0 \mathrm{d}u_{\mathrm{d}cj,r}(t)}{\mathrm{d}t} = \sum_{r} u_{\mathrm{c},r}(t) i_r$$
(9)

根据:

$$i_{\text{dej},r} = C_0 \frac{\mathrm{d}u_{\text{dej},r}(t)}{\mathrm{d}t} \tag{10}$$

将式(10)代入式(9)中,可得:  $\sum_{r} \sum_{j=1}^{N_{m}} i_{dej,r}(t) = u_{e,ab}(t)i_{ab}(t) + u_{e,be}(t)i_{be}(t) + u_{e,ca}(t)i_{ca}(t)$ (11)

链式STATCOM的整体控制策略见附录A图A1。 此时所有IGBT闭锁,当旁路开关未闭合时,情况如 图2所示。当 $i_r>0时,电流通过二极管D_1、电容C_0、$  $二极管D_4给电容C_0充电;当<math>i_r<0时,电流通过二极$  $管D_3、电容C_0、二极管D_2给电容C_0充电。$ 



#### 图2 旁路开关未闭合时故障模块的电路

Fig.2 Faulty sub-module circuit before bypass switch is closed

利用小信号分析方法,对于故障模块,可得:  

$$\Delta u_{4,r} = \frac{\Delta i_r}{1} = \frac{i_r [\sin(T_0 + T_d) - \sin T_0]}{1} \quad (12)$$

 $\Delta u_{dej,r} = \frac{1}{\omega C_0} = \frac{1}{\omega C_0}$ 理想模型下  $T_d = 0$ ,因此直流电压  $\Delta u_{dej,r} = 0$ 。

理想模型下 $I_d=0$ ,因此且流电压 $\Delta u_{dej,r}=0$ 。 所提模型的直流电压为:

$$\Delta u_{\rm dej,r} = \frac{i_r [\sin (\omega T_0 + \omega T_{\rm d}) - \sin (\omega T_0)]}{\omega C_0} = \frac{2i_r \cos \frac{\omega (2T_0 + T_{\rm d})}{2} \sin \frac{\omega T_{\rm d}}{2}}{\omega C_0} < \frac{2i_r}{\omega C_0} \quad (13)$$

可认为在发生故障前*T*。时刻系统是稳定的,根据式(8),可得:

$$u_{c,r}(T_0) + \Delta u_{c,r} = m \sin(\omega T_0 + \varphi + \gamma_r) \sum_{j=1}^{N_m} u_{dcj,r}(T_0) + \Delta u_{dcj,r}$$
(14)

结合式(10)可得:

$$\Delta u_{\rm e,r} = \Delta u_{\rm dej,r} = \frac{\Delta i_{\rm dej,r}}{\omega C_0} \approx \frac{\Delta i_r}{\omega C_0}$$
(15)

同样地,理想模型的交流电压 $\Delta u_{e,r}=0$ ,所提模 型的交流电压 $\Delta u_{e,r}=0$ ,所提模

$$\Delta i_{\text{dej},r} = C_0 \frac{\mathrm{d}\Delta u_{\text{dej},r}}{\mathrm{d}t} = (\Delta u_{\text{dej},r})^2 \approx 3\Delta i_r u_{\text{e},r} \approx 0 \quad (16)$$

这里将高阶小量近似为0,则交流电流*i*,在故障容错情况下的变化量Δ*i*,不大,因此在故障容错时理想模型和所提模型的交流电流的变化均不大。

综上所述,理论上理想模型无法复现故障容错 过程中交流电压和直流电压的暂态变化,而所提模 型可以精确反映这种变化;理想模型和所提模型的 交流电流的变化都较小,与物理过程相一致。

#### 2.2 链式STATCOM异常容错的影响分析

现有技术水平下,旁路开关存在异常电弧放电 现象,造成链式STATCOM的异常容错。功率模块 正常运行与异常时的电路工况对比如图3所示。



图3 功率模块正常与异常工况对比



理想模型的 $T_1$ 和 $T_4$ 导通,功率模块通过电容 $C_0$ 形成回路。功率模块耐受电压最大值为 $u_{dej,r}$ ,而正 常时IGBT耐压大于 $u_{dej,r}$ ,因此不会出现IGBT过压等 驱动故障。

所提模型可以模拟电弧放电现象。此时,门极-发射极电压*v<sub>e</sub>*为:

$$v_{\rm ce} = u_{\rm dcj, r} \pm u_{\rm arc} \tag{17}$$

v<sub>ce</sub>可能出现异常的电平状态,此时驱动器会认为发生故障,造成异常容错。

综上所述,理论上理想模型无法复现开关异常 电弧放电引起的IGBT驱动故障;而所提模型可以精 确反映这种变化。

#### 3 理想模型与所提模型的对比验证

#### 3.1 2种模型的精度对比验证

试验目的是为了验证 2 种模型的精度,试验方 案见图 4。图中, V为电源电压,  $R_{\rm H}$ 为模块的耗散电 阻,用于试验中限流, 取 $R_{\rm H}$ =50 Ω;  $K_{j}$ 为第j个功率模 块的旁路开关。具体试验参数见附录 B表 B1, 旁路 开关电弧放电的试验装置见附录 B图 B1。



#### 图4 模型验证的试验方案

Fig.4 Experimental scheme of model verification

利用电源给H桥充电,同时闭锁4个IGBT,使其 工作在故障闭锁状态,此时闭合旁路开关,测量励磁 电流*i*<sub>i</sub>和主回路电流*i*<sub>m</sub>,并分别与理想模型、所提模 型的仿真结果进行对比,分别见图5(a)和图5(b)。 显然,该旁路开关合闸时间在6ms以内;且相比理 想模型,所提模型更接近实测波形。

缩短接触器触头间距,令电弧放电,测量主回路 电流*i*<sub>m</sub>,并分别与理想模型、所提模型的仿真结果进 行对比,见图5(c)。可以看出,电流出现暂态过程, 与式(16)的理论结果一致。



图5 仿真和试验结果对比

Fig.5 Comparison between simulative and experimental results

综上所述,对于单一模块,所提模型可以较为精 确地模拟旁路开关的闭合过程和电弧放电过程;理 想模型在这些情况下误差较大,无法复现物理过程。

#### 3.2 2种模型在故障容错时的影响对比验证

为了验证2种模型在故障容错时,交流电压、直流电压和交流电流的变化是否与实际情况一致,在试验样机中模拟故障容错:拔掉试验样机中一个模块的通信光纤,造成通信故障,引起该模块的故障冗余容错,试验装置见附录B图B2。功率模块直流电压的额定值为36V,交流电流的额定峰值为30A。

故障容错的试验波形如图6所示。由图6(a)可见,在故障时刻的交流电压 $\Delta u_{e,ab}$ 为30V;由图6(b)可见,电流i,变化较小,仍然接近正弦波;由图6(c)可见,故障模块的直流电压 $u_{der,ab}$ 抬升了30V。

理想模型和所提模型故障容错的仿真波形对比 见图 7。由图 7(a)可见,理想模型的 $u_{e,ab}$ 几乎不变, 所提模型的 $\Delta u_{e,ab}$ =30 V;由图 7(b)可见,理想模型 和所提模型的电流变化量都接近于0;由图 7(c)可 见,理想模型的故障功率模块的直流电压 $u_{dej,r}$ 不会 上升,所提模型出现了30 V的电压抬升。

由此可知,所提模型可以复现故障容错时,链式





STATCOM交直流电压的变化,交直流电压升高约额 定电压的90%以上;理想模型仅能仿真复现交流电 流近似不变的情况。

#### 3.3 2种模型在异常容错时的影响对比验证

为了验证2种模型在异常容错时能否复现IGBT 驱动故障这一现象,在试验中,给每个功率模块安装 了电压隔离探头来测量功率模块中4个IGBT的集 电极-发射极电压*v*<sub>eel</sub>一*v*<sub>ee4</sub>,并测量端口电压*v*<sub>out</sub>。利 用罗氏线圈测量旁路开关的电流*i*<sub>k</sub>,试验装置见附 录B图B3—B5。

附录 C 图 C1 为采用故障录波器测量的实际波 形。图中, $t_0$ 为异常开始时刻; $t_1$ 为异常中心位置; $t_2$ 为稳定时刻。 $t_0$ — $t_2$ 为暂态持续时间,约为22  $\mu$ s。

 $t_0$ 时刻前, $v_{ce1}$ 为0, $v_{ce2}$ 为高电平, $v_{ce3}$ 为高电平, $v_{ce4}$ 为0, $i_k$ 为0, $v_{out}$ 为高电平。

 $t_0 - t_2$ 时段是电弧放电暂态过程, $v_{ce1}$ 上升, $v_{ce2}$ 下降, $v_{ce3}$ 下降, $v_{ce4}$ 上升, $t_1$ 时刻它们都介于0和高电平之间,属于不定态。 $i_k$ 上升, $v_{out}$ 下降为0。由于存在持续22 µs的不定态过程(大于驱动故障检测延时10 µs),会在 $t_1$ 时刻附近显示驱动故障。

 $t_2$ 时刻后,系统闭锁,通过二极管续流,导致 $v_{cel}$ 为高电平, $v_{ce2}$ 为0, $v_{ce3}$ 为高电平, $v_{ce4}$ 为0, $i_k$ 为0, $v_{out}$ 为0。

图 8 为理想模型的  $v_{cel} - v_{ce4}, i_k \pi v_{out} 仿 真波形。$ 可以看出,由于理想模型没有拉弧过程,只能立即闭锁, $v_{cel} - v_{ce4}$ 没有暂态过程,开关电流 $i_k$ 为0,端口电压 $v_{out}$ 不为0,与图C1中的开关暂态过程不符。因此,理想模型无法解释现场中出现的驱动故障问题。

图9为所提模型的 $v_{cel} - v_{cel}$ , $i_k$ 和 $v_{out}$ 仿真波形。





Fig.7 Simulative waveforms of fault tolerance for cascaded STATCOM





可以看出,所提模型存在暂态变化过程,约为20μs, 与实际情况接近;并且与图C1中t<sub>0</sub>时刻前、t<sub>0</sub>—t<sub>2</sub> 时段、t<sub>2</sub>时刻后的波形都能够对应。因此,所提模型 可以用于异常容错中驱动故障问题的仿真。



#### 图9 所提模型的仿真波形

Fig.9 Simulative waveforms of proposed model

由此可知,所提模型仿真可以复现异常容错时, 链式STATCOM旁路电弧放电引起的IGBT集电极--发射极电压的不定态过程、端口电压和电流等主要 电气量的变化,而理想模型无法复现这些现象。

#### 3.4 分析和讨论

综上所述,采用所提模型可以较准确地模拟故 障容错时交直流电压的突变,其最大值在额定电压 的90%左右,因此直流电容应当选择暂态过电压能 力2倍额定电压以上的型号,IGBT也应当考虑2倍 以上的暂态电压裕量。

采用所提模型可以较准确地仿真模拟异常容 错时 IGBT 的集电极-发射极电压的变化,这种变化 往往是 10 μs 以内的开关暂态过程。因此可以在选 择驱动器时,通过软硬件保护逻辑设计,设置 100 μs 以上的延时,避免旁路开关异常放电导致的装置误 保护停机。

#### 4 结论

本文提出了一种可旁路的H桥功率模块电路的 等效模型,并通过理论分析和试验对比了理想模型 和所提模型,得到如下结论。

(1)所提模型可以较准确地模拟旁路开关的闭 合过程、电弧放电过程;而理想模型在这些情况下误 差较大,无法复现物理过程。

(2)所提模型可以较准确地描述故障容错时链式 STATCOM 的暂态过程,交流电压升高约90%以上,交流电流近似不变;而理想模型仅能仿真复现交流电流近似不变的情况。

(3)所提模型可以仿真复现异常容错时链式 STATCOM旁路电弧放电引起的IGBT的集电极--发 射极电压的不定态过程、端口电压和电流等主要电 气量的变化;而理想模型无法复现该现象。

通过分析和讨论说明了所提模型在功率模块参数选型和保护设计中的作用:

(1)通过所提模型可以仿真计算出直流电容、 IGBT等主要器件的暂态参数,从而设计合理的安全 裕量; (2)所提模型可以仿真出旁路开关电弧放电时 IGBT的开关暂态过程,从而选择合适的驱动器和延 时策略,防止设备误动作停机。

因此,本文所提可旁路的H桥功率模块电路等 效模型,对于链式STATCOM等大功率级联H桥变流 器的参数选型、保护设计等具有一定的实际价值。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

- 张扬,常亮,杨小品.±100 Mvar高压STATCOM直接电流分相 谐振控制参数整定方法及RTDS仿真实验[J].电力系统保护 与控制,2016,44(15):27-32.
   ZHANG Yang, CHANG Liang, YANG Xiaopin. Parameter setting on independent phase resonant control of STATCOM under higher voltage and RTDS simulation experiment[J]. Power System Protection and Control,2016,44(15):27-32.
   ] 马燕峰,刘会强,俞人楠.风电场中STATCOM抑制系统功率振
- [2] 与無嘩, 对会强, 前入桶, 风电场中SIAICOM 抑制系统功率振荡[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2):67-73.
   MA Yanfeng, LIU Huiqiang, YU Rennan. STATCOM suppression system power oscillations in wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2):67-73.
- [3] FARIVAR G, TOWNSEND C D, HREDZAK B, et al. Lowcapacitance cascaded H-bridge multilevel STATCOM[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3):1744-1754.
- [4] WANG Z, ZHANG A, ZHANG H, et al. Control strategy for modular multilevel converters with redundant sub-modules using energy reallocation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3):1556-1564.
- [5]许胜,赵剑锋,许杏桃.改进型级联H桥型DSTATCOM装置n+1 冗余容错控制策略[J].电力自动化设备,2010,30(7):54-59.
   XU Sheng,ZHAO Jianfeng,XU Xingtao. Improved n+1 redundant fault-tolerant control strategy of cascaded H-bridge DSTATCOM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(7):54-59.
- [6] ZHU Minglei, ZHAO Rongxiang, ZHANG Hao, et al. A novel method for improving the fault tolerance of transformerless cascade PWM STATCOM [C] //2008 International Conference on Electrical Machines and Systems. Wuhan, China: IEEE, 2008: 1990-1994.
- [7] FEI W, LIU J, CHEN S. The research of voltage sharing and redundant fault-tolerant of chain STATCOM in high magnetic field[C]//2016 International Conference on Cybernetics, Robotics and Control(CRC). Hong Kong, China: IEEE, 2017:65-71.
- [8] 郭源博,周鑫,张晓华,等.电网不平衡条件下STATCOM的非 线性控制[J].电力自动化设备,2012,32(2):50-55.
   GUO Yuanbo, ZHOU Xin, ZHANG Xiaohua, et al. Nonlinear control of STATCOM under unbalanced condition[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(2):50-55.
- [9] 林周宏,刘崇茹,林雪华,等. 基于载波移相调制的模块化多电 平换流器冗余保护策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(20): 109-115.

LIN Zhouhong, LIU Chongru, LIN Xuehua, et al. Redundant protection strategy based on CPS-SPWM for modular multilevel converter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39 (20):109-115.

[10] LI K,ZHAO Z,YUAN L, et al. Fault tolerant control of MMC with redundant submodules based on carrier phase shift modulation[C]//2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Long Beach,CA,USA;IEEE,2016:26132619.

- [11] SONG Wenchao, HUANG A Q. Fault-tolerant design and control strategy for cascaded H-Bridge multilevel converter-based STATCOM [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010,57(8):2700-2708.
- [12] LEE C T, CHEN H C, WU P H, et al. A fault tolerant operation technique for STATCOMs based on star-connected cascaded H-bridges multilevel converter[C]//2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC). Charlotte, NC, USA: IEEE, 2015:995-1001.
- [13] HAGIWARA M,MAEDA R,AKAGI H. Negative-sequence reactive-power control by a PWM STATCOM based on a modular multilevel cascade converter(MMCC-SDBC)[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(2):720-728.
- [14] 鲍光海,吴守龙. 接触器短路分断特性的动力学仿真及实验研究[J]. 电工技术学报,2014,29(9):181-186.
   BAO Guanghai, WU Shoulong. Dynamics simulation and experimental research on short-circuit breaking characteristics of contactor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014,29(9):181-186.
- [15] 纽春萍,陈德桂,李兴文,等. 交流接触器触头弹跳的仿真及影响因素[J]. 电工技术学报,2007,22(10):85-90.
  NIU Chunping,CHEN Degui,LI Xingwen, et al. Dynamics simulation and simulation of contact bounce of AC contactor and study of its influence factors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2007,22(10):85-90.
- [16] 刘青,徐宏璐.提高STATCOM / BESS风电系统频率与电压支 撑的智能联调优化控制方法[J].电力自动化设备,2020,40 (7):62-71.
  LIU Qing,XU Honglu. Intelligent joint adjustment and optimization control method to improve the frequency and voltage support of STATCOM / BESS wind power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(7):62-71.
- [17] TSENG K J, WANG Y. Dynamic electric arc model for electronic circuit simulation [J]. Electronics Letters, 1996, 32(8): 705-707.
- [18] BHONSLE D C, KELKAR R B. New time domain electric arc furnace model for power quality study[J] //2014 6th India International Conference on Power Electronics(IICPE). Kurukshetra, India: IEEE, 2014:1-6.
- [19] 王育飞,潘艳霞,姜建国. 基于 MATLAB 的交流电弧炉随机模型与仿真[J]. 高电压技术,2008,34(5):973-976.
   WANG YUfei, PAN Yanxia, JIANG Jianguo. Stochastic model of AC electric arc furnace based on MATLAB[J]. High Voltage Engineering,2008,34(5):973-976.
- [20] 张扬,万安平.大功率链式STATCOM电磁暂态快速等效建模和误差评估[J].电力自动化设备,2019,39(3):97-102.
   ZHANG Yang, WAN Anping. Electromagnetic transient equivalent fast modeling and error estimate of high power chain circuit STATCOM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019,39(3):97-102.

#### 作者简介:



张扬

张 扬(1985—),男,河南南阳人,副 教授,博士后,博士,从事大功率电力电子 变换器的建模与控制方面的研究(E-mail: rxzhangyang@foxmail.com);

万安平(1983—),男,江西南昌人,副 教授,博士后,博士,通信作者,从事复杂装 备寿命预测及维修方面的研究(E-mail: anpingwan@zju.edu.cn)。

(编辑 李莉)

(下转第76页 continued on page 76)

#### Analysis on DC-side input impedance and AC / DC power coupling relationships of star cascaded STATCOM

WU Xiaodan, WANG Pengfei, CAO Dongming

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract**: The phenomenon of DC-side voltage instability of star cascaded STATCOM (STATic synchronous COMpensator) occurs frequently when AC system fault happens, which brings difficulties to its application. Firstly, the phase compensation factor and current cross decoupling technology are introduced to deduce the AC-side input admittance, and the DC-side input impedance is deduced by mathematical model extended analysis of the power module. According to the obtained AC-side input admittance and DC-side input impedance, the relationship between AC-side voltage disturbance and DC-side voltage disturbance is established, and the AC / DC power coupling relationship is analyzed. Analysis result shows that the AC-side disturbance voltage causes AC disturbance current through AC-side input admittance, and DC-side voltage disturbance is formed by two AC disturbance current through DC voltage control loop. The final DC-side voltage are adopted to verify the experimental results. The experimental results show that the proposed method can accurately analyze the DC-side voltage disturbance level under AC system fault.

Key words: STATCOM; input admittance; input impedance; AC / DC power coupling; feedforward control of voltage; hardware in-loop dynamic simulation experiment

(上接第69页 continued from page 69)

#### Switching transient analysis of redundant fault-tolerant process of cascaded STATCOM

ZHANG Yang<sup>1,2</sup>, WAN Anping<sup>3</sup>, DENG Caibo<sup>2</sup>, LIN Weixing<sup>4</sup>

(1. School of Mechanical and Electric Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China;

2. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China;

3. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

4. TBEA Xinjiang New Energy Co., Ltd., Urumqi 830011, China)

**Abstract**: The redundant fault-tolerant control of power module is critical to the improvement of cascaded STATCOM(STATic synchronous COMpensator) reliability. Redundant fault tolerance includes fault tolerance and abnormal fault tolerance. At present, the ideal models are often used to describe the redundant fault-tolerant process of the system, which cannot well reflect the switching transient process in these two situations. So an equivalent circuit model is proposed, which comprehensively considers the influence of contactor excitation circuit and arc discharge. The mathematical model of switching transient in redundant fault-tolerant process is established, and the proposed model is compared with the ideal model through theoretical analysis, simulation and experiments. Results show that the proposed model can more accurately describe the switching transient process in the redundant fault-tolerant process of system.

Key words: redundant fault tolerance; equivalent model; cascaded STATCOM; transient analysis; bypass switch

附录 A



注:  $i_{rq}^{*}$  为第 r 条换流链的电流指令:  $u_{dc_r}^{*}$  为第 r 条换流链的直流电压指令:  $u_{dcr}$  为第 r 条换流链的平均直流电压; r=ab,bc,ca。

#### 图 A1 链式 STATCOM 的整体控制策略 Fig.A1 Control strategy of cascaded STATCOM

### 附录 B

#### 表 B1 试验中 H 桥功率模块的主要参数 Table B1 Main parameters of H-bridge sub-module in test

参数	数值	参数	数值
接触器励磁电压 uf	24 V	电源电压 V(直流)	100 V
接触器额定电流 if	30 A	H桥 IGBT 额定电压 V <sub>IGBT</sub>	600 V
电弧时间常数 τ	1 µs	H桥 IGBT 额定电流 I <sub>IGBT</sub>	30 A
接触器寄生电容 $C_{\Delta}$ (电桥实测值)	62 mF	H桥电容容值 C0	$4\ 000\ \mu F$
接触器分布电阻 R <sub>cua</sub> (电桥实测值)	0.003 Ω	H 桥电阻 R <sub>H</sub>	50 Ω



图 B1 旁路开关电弧放电的试验装置 Fig.B1 Test device for arc discharge of bypass switch



图 B2 链式 STATCOM 故障容错的试验装置 Fig.B2 Test equipment of faulty redundancy for cascaded STATCOM



图 B3 异常容错试验换流链 Fig.B3 Test convert chains of abnormal redundancy



图 B4 电流采样点 Fig.B4 Current measurement points



图 B5 v<sub>ce</sub> 电压采样点 Fig.B5 v<sub>ce</sub> measurement points

附录 C



