基于桥臂阻尼阀组的模块化多电平换流器故障快速清除与系统恢复技术

司志磊[1,2],陆 翌[3],韩 坤[1,2],范彩云[1,2],夏克鹏[1,2],胡四全[1,2]
(1. 许继电气股份有限公司,河南 许昌 461000;2. 许继集团有限公司,河南 许昌 461000;
3. 国网浙江省电力公司,浙江 杭州 310000)

摘要:针对柔性直流故障快速清除与系统快速恢复技术难题,介绍了基于桥臂阻尼阀组的故障快速清除与系统恢复技术方案。在分析柔性直流双极短路和桥臂短路2种故障机理的基础上,提出适用于工程的桥臂阻尼阀组的具体电气拓扑和阻尼阀组的控制保护策略以及桥臂阻尼参数的选取原则和工程参数设计流程。以某多端柔性直流输电工程为例进行了仿真验证,仿真结果表明,在直流双极短路故障条件下,所提方案可加快直流短路电流的衰减,实现故障清除后系统快速重启动;在桥臂短路条件下,所提方案可加速阀侧交流电流中直流分量的衰减,加快交流开关的开断过程,降低了换流阀故障损坏的风险。仿真结果验证了所提方案的有效性和可行性。

关键词:模块化多电平换流器;桥臂阻尼阀组;直流故障;桥臂短路故障;故障清除;快速恢复;重启动
中图分类号:TM 46;TM 76 文献标识码:A DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.04.009

0 引言

新型模块化多电平换流器MMC(Modular Multi-level Converter)作为实现柔性直流输电工程化的电压源型换流器拓扑之一,近年来逐渐受到学术界和工程界的关注[1-4]。工程中已投运的以及正在建设的柔性直流输电工程的拓扑结构大多采用基于半桥式子模块的模块化多电平换流器[5]。在不配置直流断路器的条件下,系统不具备直流短路故障快速隔离及系统快速恢复的能力,使得多端柔性直流输电系统无法实现故障的快速隔离与系统的快速恢复,同时限制了架空线柔性直流输电技术的应用[6-7]。

针对柔性直流输电系统直流短路故障隔离的技术方案主要有以下3种[8-14]:第一种方案是通过换流阀闭锁及跳开交流进线断路器实现直流系统与交流系统的隔离,该方案被已投运的大多数柔性直流输电工程所采用,但其无法实现直流短路故障的快速隔离与系统的快速恢复;第二种方案是采用直流断路器切断故障电流,该方案可实现直流故障电流的迅速切除,但高电压、大电流的直流断路器价格昂贵;第三种方案是采用具有直流故障自清除能力的柔性直流输电换流器。目前具有直流故障自清除能力的柔性直流输电换流阀子模块的拓扑有全桥型、单箝位型、双箝位型等新型换流器拓扑。通过换流器自身的控制可实现直流故障的快速清除及系统的快速恢复,无需配置直流断路器,已成为研究的热点。然而第三种方案具有较高的技术复杂度且不成熟,并且难以实现对现有基于半桥式子模块的柔性直流输电工程进行技术改造。

文献[15-16]对基于桥臂阻尼技术的柔性直流输电进行了相关的研究:文献[15]提出了桥臂阻尼的基本原理拓扑图,但未分析工程用桥臂阻尼阀组的具体电气拓扑;文献[16]提出了基于桥臂阻尼的直流线路故障选线策略及直流线路故障恢复方案,分析了系统发生单极接地、双极短路故障时的选线策略,主要侧重于系统级控制保护,但并未分析桥臂阻尼对系统交流侧电流过零点的影响。本文在上述文献的基础上提出了适用于基于模块化多电平换流器的高压直流输电(MMC-HVDC)的桥臂阻尼阀组的具体电气拓扑和阻尼阀组的控制保护策略及桥臂阻尼参数的选取原则和工程参数设计流程,分析了桥臂阻尼对系统故障快速恢复及系统交流侧电流过零点的影响。通过对舟山多端柔性直流输电工程发生直流双极短路、桥臂短路2种故障工况进行仿真验证,仿真结果表明了所提技术方案的有效性、可行性。

1 半桥式柔性直流输电系统直流双极短路故障电流机理分析

基于半桥式子模块的模块化多电平换流器拓扑最大的缺陷在于:当直流侧发生双极短路故障时,故障电流通过桥臂电感、平波电感及半桥子模块反并联二极管构成续流回路。由于故障电流无法快速消除,致使换流阀承受很大的短路电流冲击,很可能造成整

收稿日期:2017-03-30;**修回日期**:2018-03-02
基金项目:国家电网公司科技项目(柔性直流输电故障快速恢复系统工程化技术研究及示范应用研究项目)(5292C0-160015)
Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (Engineering Technology Research and Demonstration Application Research Project of Flexible HVDC Fault Recovery System) (5292C0160015)

个系统停运且故障恢复时间长。系统发生直流双极短路故障时,直流母线电压降为 0,电容对故障点放电电流、交流馈入电流导致直流母线电流和交流电流迅速增大,无论换流站工作在何种控制方式,其初始故障特性基本相同。系统发生直流双极短路故障后,桥臂流过的电流可以分为两部分:交流系统馈入短路电流和子模块电容放电电流[17-18]。

1.1　换流阀子模块放电电流计算

子模块电容放电单相等值电路如图 1 所示。初始条件为:$u_C(0_+)=u_C(0_-)=U_{dc}$,$i_1(0_+)=i_1(0_-)=I_1$。图 1 中,n 为上、下桥臂投入子模块个数之和;C_0 为子模块电容容值;L 为桥臂电感;R_{stray} 为杂散电阻。

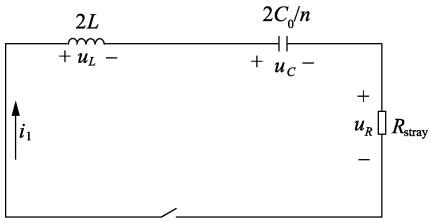


图 1　子模块电容放电单相等值电路

Fig.1　Single-phase equivalent circuit of sub-module capacitor discharging

随着子模块投切,上、下桥臂电容相当于并联,等值电容是桥臂电容的 2 倍,用 $2C_0/n$ 表示。

由于故障瞬间直流电压 U_{dc} 和电感电流 I_1 均不为 0,而且实际系统中的杂散电阻 R_{stray} 通常远小于 $2\sqrt{nL/C_0}$,因此闭锁前的放电过程是一个已知初始条件的振荡放电过程,电容电压计算公式为:

$$u_C=\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau_1}}\left[\frac{U_{dc}\omega_0}{\omega}\sin(\omega t+\alpha)-\frac{nI_1}{2\omega C_0}\sin(\omega t)\right] \tag{1}$$

电容放电电流可表示为:

$$i_1=\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau_1}}\left[U_{dc}\sqrt{\frac{C_0}{nL}}\sin(\omega t)+I_1\cos(\omega t)\right] \tag{2}$$

其中,τ_1 为放电电流衰减时间常数;ω_0 为放电电流的固有角频率,即谐振频率;ω 为振荡放电电流的角频率;α 为由初始电流引起的放电电流的初相角。τ_1、ω_0、ω、α 这 4 个变量均由电路参数决定,见式(3)。

$$\begin{cases}\tau_1=\dfrac{4L}{R_{stray}}\\ \omega_0=\dfrac{1}{2}\sqrt{\dfrac{n}{LC_0}}\\ \omega=\dfrac{1}{2}\sqrt{\dfrac{n}{LC_0}-\left(\dfrac{R_{stray}}{2L}\right)^2}\\ \alpha=\arctan\sqrt{\dfrac{4nL}{C_0R_{stray}^2}-1}\end{cases} \tag{3}$$

1.2　交流系统馈入短路电流的计算

交流馈入桥臂短路电流的单相等效电路见图 2。

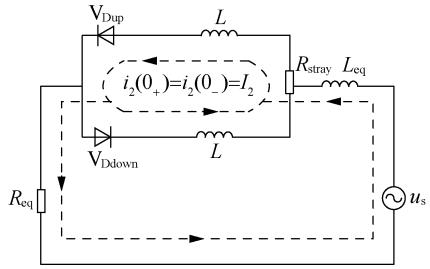


图 2　交流馈入短路电流单相等效电路

Fig.2　Single-phase equivalent circuit of AC feed-in short circuit current

设交流相电压峰值为 U_s,初相角为 φ,交流电流可以解析为:

$$i=\frac{U_s\cos(\varphi+\gamma)}{|Z|}\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau_2}}-\frac{U_s\cos(\omega_s t+\varphi+\gamma)}{|Z|} \tag{4}$$

$$\begin{cases}\tau_2=\dfrac{L/2+L_{eq}}{R_{eq}+R_{stray}/4}\\ |Z|=\sqrt{(R_{eq}+R_{stray}/4)^2+\omega_s^2\,(L/2+L_{eq})^2}\\ \gamma=\arctan\dfrac{R_{eq}+R_{stray}/4}{\omega_s(L_{eq}+L/2)}\end{cases} \tag{5}$$

其中,ω_s 为工频角频率;R_{eq} 为交流电源与换流器间等值电阻;L_{eq} 为交流电源与换流器间等值电感。

考虑最严重的直流偏置情况,即 $\cos(\varphi+\gamma)=1$,且不包含换流阀放电电流值,由式(4)可以推导桥臂电流的解析为:

$$\begin{cases}i_u=\dfrac{U_s}{2|Z|}[1-\cos(\omega_s t)]\\ i_d=\dfrac{U_s}{2|Z|}[1+\cos(\omega_s t)]\end{cases} \tag{6}$$

1.3　直流侧短路电流的计算

直流侧发生直流短路故障后,直流侧直流母线电压降为 0。而直流短路电流由两部分组成:电容放电产生的电流 i_1 和交流馈入的短路电流 i_{up}。基于节点电流法,直流侧电流解析表达为:

$$\begin{cases}I_{dc}=3(i_1+i_{up})=3i_1+\dfrac{3U_s}{2|Z|}\\ i_1=\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau_1}}\left[-U_{dc}\sqrt{\dfrac{C_0}{nL}}\sin(\omega t)+I_1\cos(\omega t)\right]\end{cases} \tag{7}$$

2　半桥式柔性直流输电系统桥臂短路电流机理分析

半桥式柔性直流输电系统发生桥臂短路故障时,交流电流迅速增大,不妨设 a 相上桥臂发生短路故障,且交流系统电压 $U_b>U_a>U_c$,则故障电流回路如图 3 所示,故障电流通过 b 相上桥臂下管反并联二极管流入故障桥臂。

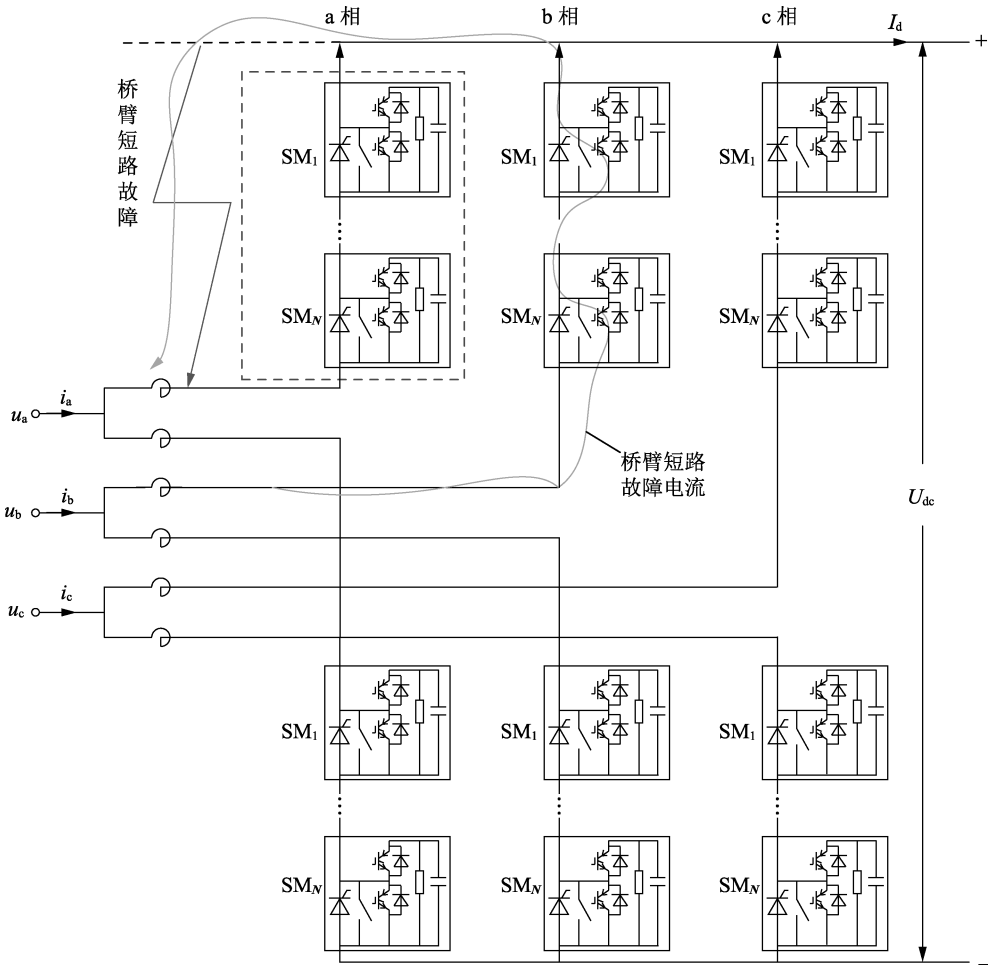


图3 半桥式柔性直流输电系统桥臂短路故障电流回路示意图

Fig.3 Schematic diagram of current circuit of semi-bridge flexible DC transmission system with bridge-arm short circuit fault

将上述电路进行等效,如图4所示。设交流相电压为 $u_s=\sqrt{2}U_s\sin(\omega_s t)$,初相角为 γ,此时交流电流可以解析为:

$$i=I_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}}-\frac{\sqrt{2}U_s\cos(\omega_s t+\gamma)}{2|Z|} \tag{8}$$

$$\begin{cases}\tau_2=\dfrac{2L+L_{eq}}{R_{eq}+R_{stray}}\\ |Z|=\sqrt{(R_{eq}+R_{stray})^2+\omega_s^2(2L+L_{eq})^2}\\ \gamma=\arctan\dfrac{R_{eq}+R_{stray}}{\omega_s(L_{eq}+2L)}\end{cases} \tag{9}$$

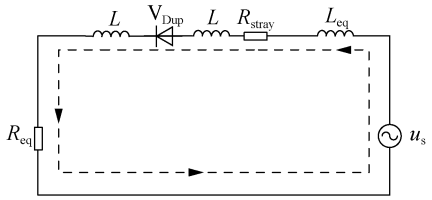


图4 半桥式柔性直流输电系统桥臂短路故障等效回路

Fig.4 Equivalent circuit of semi-bridge flexible DC transmission system with bridge-arm short circuit fault

由上述理论分析可知,桥臂发生短路故障时,阀侧交流出现过电流,除了包含交流分量外,还存在较大的直流偏置,这必然造成交流侧电流过零延迟,导致交流断路器的延时分断,影响换流器的故障停运,对换流阀设备的安全造成威胁。

3 基于桥臂阻尼阀组的直流故障快速恢复技术方案

基于第1、2节对半桥式柔性直流输电系统直流短路和桥臂短路故障机理的分析,本节提出了采用基于桥臂阻尼阀组的半桥式柔性直流输电系统直流故障快速隔离与系统快速恢复技术方案,即在原半桥子模块的柔性直流输电中增加具有桥臂阻尼功能的换流阀组件。

图5为发生直流双极短路故障且换流阀闭锁及交流断路器跳开后,短路电流续流回路的单相等效电路。短路电流 I_2 通过桥臂电感、直流电感、换流阀子模块反并联二极管及具有桥臂阻尼功能的换流阀组件构成续流回路。桥臂阻尼电阻 R_v 的存在将加快直流短路电流的衰减。

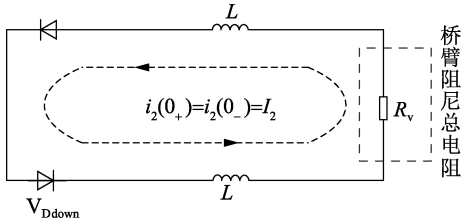


图 5　双极短路电流单相等效电路

Fig.5　Single-phase equivalent circuit of pole-to-pole short circuit current

图 6 为发生桥臂短路故障且换流阀闭锁后,短路电流续流回路的等效电路。短路电流通过桥臂电感、换流阀子模块反并联二极管及具有桥臂阻尼功能的换流阀组件构成续流回路。由于桥臂阻尼电阻 R_v 的存在,式(8)中直流电流分量的时间常数将显著减小,这将加快阀侧交流电流直流分量的衰减,且交流电流幅值减小,加速交流开关的跳闸过程。

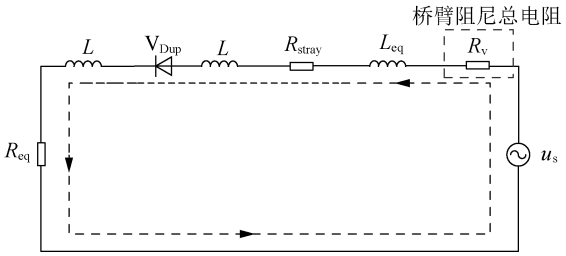


图 6　短路电流续流回路的等效电路

Fig.6　Equivalent continuous current circuit of short circuit current

3.1　具有桥臂阻尼的柔性直流输电换流阀组件拓扑结构

桥臂阻尼功能由具有桥臂阻尼的柔性直流输电换流阀组件实现。具有桥臂阻尼的柔性直流输电换流阀组件的拓扑结构如图 7 所示,该拓扑主要包括半桥子模块与阻尼模块两部分。

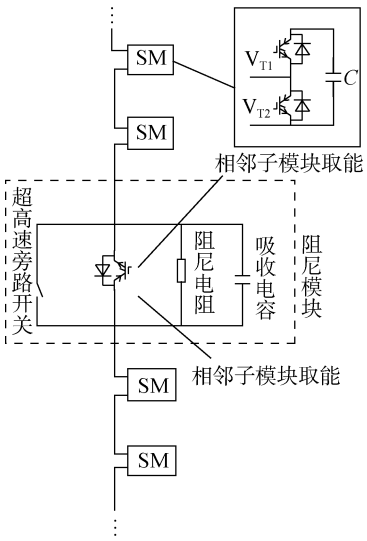


图 7　具有桥臂阻尼的柔性直流输电换流阀组件拓扑结构

Fig.7　Topology structure of flexible HVDC converter valve groups with bridge-arm damping

阀组件中阻尼模块由 IGBT(V_{T1})、阻尼电阻、超高速旁路开关、吸收电容以及阻尼模块控制器构成,其控制器电源取自相邻的半桥子模块,取能采用双冗余高电位取能技术,避免阻尼模块与供电子模块在故障发生时刻的相互影响。阻尼模块的主电路采用 IGBT(带反并联二极管)与阻尼电阻构成并联结构。超高速旁路开关用以实现阻尼模块的故障旁路以及冗余控制。吸收电容用以吸收 IGBT 关断过程中的电压尖峰。

换流阀组件的结构如图 8 所示,其主要包括两侧的铝支撑梁、中部阀组件绝缘支撑梁、子模块连接导电排、阻尼模块、半桥子模块、模块绝缘支撑导轨、阀组件主水管和分支主水管等。阻尼模块阀与子模块阀结构相同,便于安装、插拔。

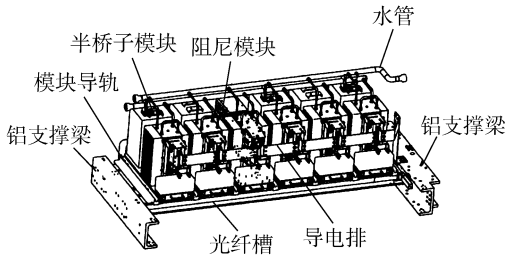


图 8　具有桥臂阻尼的换流阀组件结构图

Fig.8　Structure of converter valve groups with bridge-arm damping

3.2　具有桥臂阻尼的柔性直流输电换流阀控制保护策略

含有桥臂阻尼的柔性直流输电系统的直流双极短路故障隔离与系统快速恢复控制保护策略为:控制保护系统检测到直流双极短路故障发生后,执行换流阀闭锁的同时触发晶闸管和投入阻尼模块(阻尼功能正常),当阻尼功能失效时,阻尼不投入;同时发出跳开交流断路器的指令,使得故障电流迅速衰减至整定值时能够立即跳开直流侧快速机械开关,交流开关去游离后重新合闸,直流快速机械开关重合,换流阀充电完成后换流器重新解锁,直至直流功率恢复。故障隔离和系统快速恢复整个过程的控制保护逻辑流程图如图 9 所示。

含有桥臂阻尼的柔性直流输电系统的桥臂短路故障隔离控制保护策略为:桥臂短路为极端恶劣工况,一般为系统永久性故障,换流器需闭锁停机;当发生桥臂短路故障时,同步闭锁换流阀和投入阻尼模块(阻尼功能正常),并触发晶闸管导通,跳开交流侧开关,阻尼模块投入后,将加快阀侧交流电流直流分量的衰减,加速交流开关的跳闸过程,降低换流阀故障损坏的风险,故障清除后,阻尼模块从系统中切除。整个过程的控制保护逻辑流程图如图 10 所示。

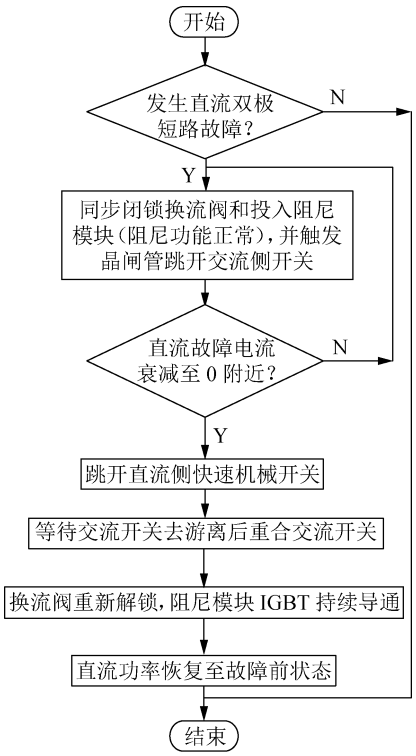


图9 含有桥臂阻尼的柔性直流输电系统直流双极短路故障隔离与系统快速恢复控制保护逻辑流程图

Fig.9 Control and protection logic of pole-to-pole short circuit fault isolation and fast recovery of flexible HVDC with bridge-arm damping

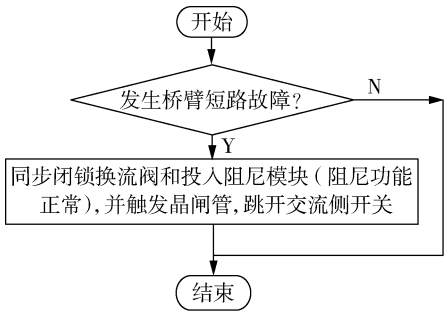


图10 含有桥臂阻尼的柔性直流输电系统桥臂短路故障隔离控制保护逻辑流程图

Fig.10 Control and protection logic of bridge-arm short circuit fault isolation and fast recovery of flexible HVDC with bridge-arm damping

具有桥臂阻尼的柔性直流输电换流阀组件的控制保护策略为:换流阀正常运行时,V_{T1}处于持续导通状态,阻尼电阻被旁路,一旦检测到系统发生短路故障,立即闭锁V_{T1},阻尼电阻被投入,该阻尼模块与其他正常子模块串联在桥臂中,如果阻尼模块本身出现故障,则执行旁路开关闭合,将该阻尼模块故障旁路,当故障数超出一定数目时,阻尼功能失效;配置吸收电容的目的在于抑制阻尼模块投入瞬间的过电压,以保护阻尼模块免受过电压损坏。桥臂阻尼换流阀组件控制保护流程图如图11所示。

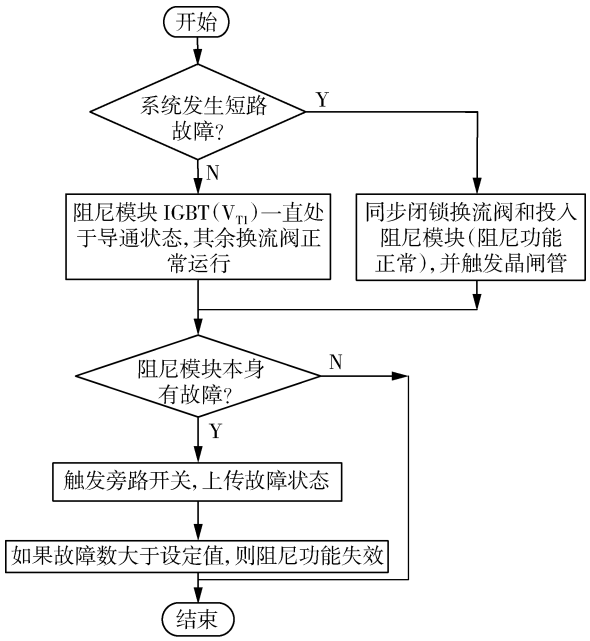


图11 桥臂阻尼换流阀组件控制保护流程图

Fig.11 Control and protection flowchart of converter valve groups with bridge-arm damping

3.3 桥臂阻尼电阻选取原则及工程参数设计流程

不施加桥臂阻尼时,对系统发生双极金属性短路故障和单桥臂短路故障进行仿真分析。确定在上述2种故障工况发生后换流阀闭锁且交流断路器断开后的最大桥臂短路电流,以此为依据,确定桥臂阻尼器的最高电压(综合考虑现有IGBT器件安全工作电压、便于工程实施的单桥臂阻尼模块的配置数目)。

根据初步确定的桥臂阻尼电阻值,研究施加桥臂阻尼时系统发生双极金属性短路故障特性及单桥臂短路故障特性,包括桥臂阻尼器投入前阻尼模块IGBT和反并联二极管的最大电压、电流,投入瞬间的最大电压、电流,以及短路电流衰减时间、衰减幅度,最终确定桥臂阻尼电阻值。

桥臂阻尼工程参数设计流程如图12所示。

4 仿真研究

以舟山多端柔性直流输电工程洋山站为例,系统参数如下[19-20]:额定容量为120 MV·A,额定直流电压为±200 kV,阀侧交流电压为208 kV,桥臂电感为350 mH,软启电阻为26 kΩ,换流变压器漏抗为14%,桥臂子模块数为264,桥臂阻尼模块个数为15,阻尼电阻阻值为1 Ω,阻尼电阻热容量为500 kJ,分别进行直流双极短路故障及桥臂短路故障仿真分析。

4.1 双极短路故障仿真分析

双极短路故障仿真工况1:未配置桥臂阻尼换流阀,系统0.2 s时直流母线发生双极短路故障,故障检测时间2 ms并执行换流阀闭锁,交流侧断路器

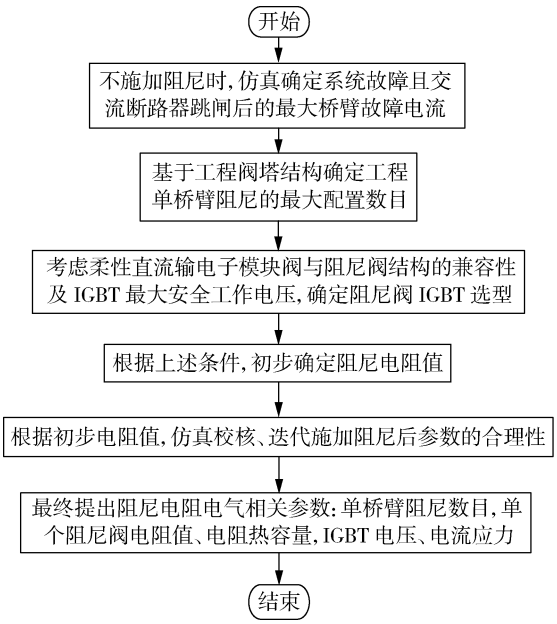


图 12　桥臂阻尼工程参数设计流程图

Fig.12　Flowchart of designing engineering parameters of bridge-arm damping

在 0.3 s 时跳开。直流电流与桥臂电流的发展过程仿真结果分别如图 13、图 14 所示。

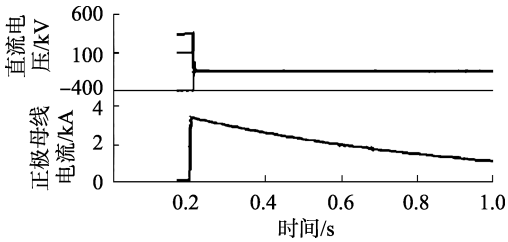


图 13　直流双极短路故障直流电压、电流

Fig.13　DC voltage and current of DC pole-to-pole short circuit fault

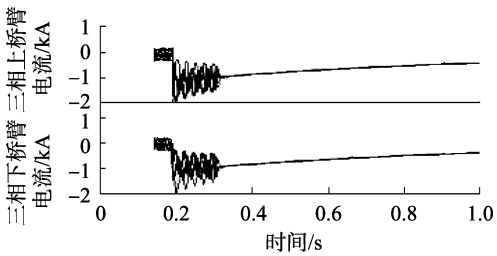


图 14　直流双极短路故障桥臂电流

Fig.14　Bridge-arm current of DC pole-to-pole short circuit fault

由图 13、14 所示的短路电流发展过程可以看出,基于半桥式子模块的柔性直流输电系统发生双极短路故障时,直流短路电流在换流阀闭锁及交流断路器断开后,由于短路续流回路桥臂电感、直流电感和反并联二极管的续流作用,仍存在较大的拖尾电流,且此拖尾电流衰减至 0 附近的时间需要数秒(衰减时间由短路电流回路电感与杂散电阻确定的时间常数决定)。当前基于半桥式子模块的柔性直流输电系统直流侧配置主开关为直流隔离开关,无法实现短路电流的即时切断,直到短路电流衰减至 0 附近时才能实现直流故障的隔离。

由于故障隔离时间长,换流阀闭锁及交流断路器断开后,换流阀子模块继续通过自身损耗放电,导致其子模块电压无法维持子模块控制器的正常工作,因此换流器重启过程仍需经过完整的换流阀充电的顺控流程,换流器重新启动过程至少需要几分钟甚至是十几分钟。

双极短路仿真工况 2:配置桥臂阻尼换流阀,系统 0.2 s 时直流母线发生双极短路故障,故障检测时间 2 ms 并执行换流阀闭锁,交流侧断路器在 0.3 s 时跳开。直流电流与桥臂电流的发展过程仿真结果分别如图 15、图 16 所示。

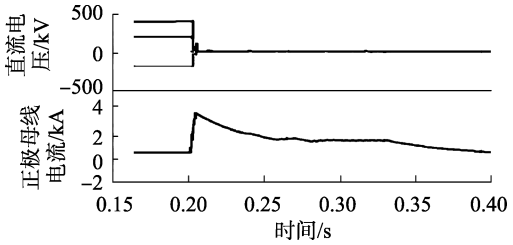


图 15　配置桥臂阻尼时直流双极短路故障直流电压、电流

Fig.15　DC voltage and current of DC pole-to-pole short circuit fault when equipping bridge-arm damping

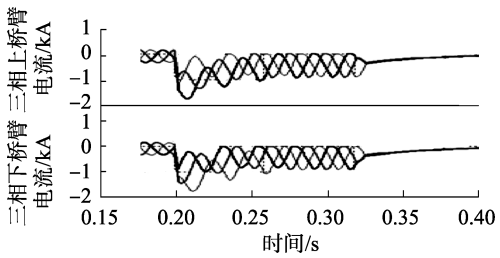


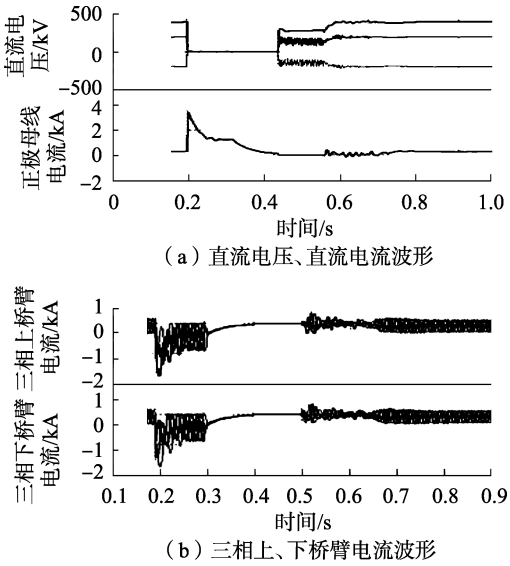
图 16　配置桥臂阻尼时直流双极短路故障桥臂电流

Fig.16　Bridge-arm current of DC pole-to-pole short circuit fault when equipping bridge-arm damping

由图 15、图 16 所示的短路电流发展过程可以看出,当配置桥臂阻尼时,直流短路电流在换流阀闭锁以及交流断路器跳开后,经桥臂电感、直流电感、反并联二极管和阻尼电阻迅速衰减,在故障发生后的 200 ms 内衰减至 0 附近。可以看出,在换流阀组件中配置桥臂阻尼,加快了直流短路电流的衰减,为直流故障的快速隔离与直流系统快速重启动创造了条件。

基于桥臂阻尼技术,进行直流故障快速隔离与系统快速重启动全过程进行仿真分析。仿真参数不变。仿真工况:0.2 s 时直流母线发生双极短路故障,故障检测时间 2 ms 并执行换流阀闭锁,交流断路器在 0.3 s 时跳开,0.4 s 时直流短路故障清除且交

流断路器重合闸,0.5 s 时换流阀重新解锁,0.7 s 直流功率恢复。整个过程的直流电压、直流电流、桥臂电流仿真波形如图 17 所示。



(a) 直流电压、直流电流波形

(b) 三相上、下桥臂电流波形

图 17 配置桥臂阻尼时直流双极短路故障隔离与系统快速恢复过程仿真结果

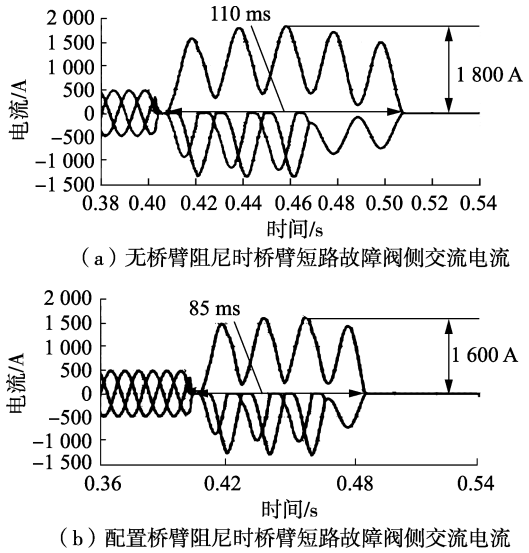
Fig.17 Simulative results of DC pole-to-pole fault isolation and fast recovery of flexible HVDC when equipping bridge-arm damping

由图 17 可以看出,直流短路电流在直流故障发生后 200 ms 内衰减至 0 附近,实现了直流故障的快速隔离,0.4 s 时交流断路器重合闸,0.5 s 时换流阀重新解锁,0.7 s 时实现了直流功率的恢复。从直流双极短路故障的发生时刻起,在 600 ms 内实现了直流功率的平稳恢复,整个过程中桥臂冲击电流均在换流阀耐受的范围之内。

4.2 桥臂短路仿真分析

桥臂短路仿真工况:0.4 s 时发生 A 相上桥臂短路故障,故障检测时间 2 ms 并执行换流阀闭锁并发出交流断路器跳开指令。桥臂阻尼配置前后,阀侧交流故障电流发展过程的对比仿真结果如图 18 所示。

由图 18 可以看出,无桥臂阻尼时,系统 0.4 s 发生 A 相上桥臂短路故障时,阀侧交流电流最大峰值达到 1 800 A,且存在较大的直流偏置,造成 A 相电流过零延迟,直到故障发生 110 ms 后交流断路器才分断,影响了换流器的故障停运,对换流阀设备的安全造成威胁;配置桥臂阻尼后,同样 0.4 s 发生 A 相上桥臂短路故障时,一方面限制了故障电流,阀侧交流电流最大峰值限至 1 600 A,另一方面加速了故障电流直流偏置的衰减,在故障发生后 85 ms 就完成了交流断路器的分断,分断时间显著缩短。可见,在桥臂短路条件下桥臂阻尼可显著加快阀侧交流电流直流分量的衰减,加速交流开关的跳闸过程。



(a) 无桥臂阻尼时桥臂短路故障阀侧交流电流

(b) 配置桥臂阻尼时桥臂短路故障阀侧交流电流

图 18 配置桥臂阻尼前后桥臂短路故障阀侧交流电流对比

Fig.18 Comparison of AC valve current of bridge-arm short circuit fault before and after equipping bridge-arm damping

5 结论

本文在基于半桥式子模块柔性直流输电直流短路故障机理的基础上,介绍了基于桥臂阻尼阀组的半桥式柔性直流输电系统直流故障快速隔离与系统快速恢复技术方案,并提出了适用于 MMC-HVDC 的桥臂阻尼阀组的具体电气拓扑和阻尼阀组的控制保护策略以及桥臂阻尼参数的选取原则和工程参数设计流程。对直流双极短路故障及桥臂短路故障进行仿真分析,仿真结果表明:在直流双极短路故障条件下,该方案可加快直流短路电流的衰减,实现故障清除后系统快速重启动;在桥臂短路条件下,该方案可显著加快阀侧交流电流直流分量的衰减,加快交流开关的开断过程,降低了换流阀故障损坏的风险,为柔性直流输电工程的故障快速清除及快速恢复技术的工程化应用奠定了基础。

参考文献:

[1] 韦延芳,卫志农,孙国强,等. 一种新型的高压直流输电技术——MMC-HVDC[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):1-9.
WEI Yanfang,WEI Zhinong,SUN Guoqiang,et al. New HVDC power transminssion techonology: MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):1-9.

[2] 徐政,屠卿瑞,裘鹏,等. 从 2010 国际大电网会议看直流输电技术的发展方向[J]. 高电压技术,2010,36(12):3070-3077.
XU Zheng,TU Qingrui,QIU Peng,et al. New trends in HVDC technology viewed through CIGRE 2010[J]. High Voltage Engineering,2010,36(12):3070-3077.

[3] PERALTA J,SAAD H,DENNETIERE S,et al. Detailed and averaged model sfora 401-level MMC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2012,27(3):1501-1509.

[4] 韩坤,吴金龙,刘欣和,等. 大规模多节点模块化多电平柔性直

流输电换流阀控制周期优化设计方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(1):36-43.
HAN Kun,WU Jinlong,LIU Xinhe,et al. Optimized design of converter valve control period for large-scale multi-node MMC-based HVDC-flexible[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(1):36-43.

[5] 汤广福,罗湘,魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):8-17.
TANG Guangfu,LUO Xiang,WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(10):8-17.

[6] 徐政,薛英林,张哲任. 大容量架空线柔性直流输电关键技术及前景展望[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5051-5062.
XU Zheng,XUE Yinglin,ZHANG Zheren. VSC-HVDC technology suitable for bulk power overhead line transmission[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(29):5051-5062.

[7] 赵成勇,陈晓芳,曹春刚,等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流侧故障控制保护策略[J]. 电力系统自动化,2011,35(23):82-87.
ZHAO Chengyong,CHEN Xiaofang,CAO Chungang,et al. Control and protection strategies for MMC-HVDC under DC faults[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(23):82-87.

[8] 吴婧,姚忠良,王志冰,等. 直流电网 MMC 拓扑及其直流故障电流阻断方法研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(11):2681-2694.
WU Jing,YAO Zhongliang,WANG Zhibing,et al. The study of MMC topologies and their DC fault current blocking capacities in DC grid[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(11):2681-2694.

[9] 李斌,何佳伟. 多端柔性直流电网故障隔离技术研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(1):87-95.
LI Bin,HE Jiawei. Research on the DC fault isolating technique in multi-terminal DC system[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(1):87-95.

[10] 薛英林,徐政. C-MMC 直流故障穿越机理及改进托扑方案[J]. 中国电机工程学报,2013,33(21):63-70.
XUE Yinglin,XU Zheng. DC fault ride-through mechanism and improved topology scheme of C-MMC[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(21):63-70.

[11] 张建坡,赵成勇. MMC-HVDC 直流侧故障特性仿真分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(7):32-38.
ZHANG Jianpo,ZHAO Chengyong. The research of direct current side fault characters of MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(7):32-38.

[12] ZENG R,XU L,YAO L,et al. Design and operation of a hybrid modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2014,30(3):1137-1146.

[13] 赵成勇,许建中,李探. 全桥型 MMC-MTDC 直流故障穿越能力分析[J]. 中国科学:技术科学,2013,43(1):106-114.
ZHAO Chengyong,XU Jianzhong,LI Tan. DC faults ride-through capability analysis of full-bridge MMC-MTDC system[J]. Science China:Technological Sciences,2013,43(1):106-114.

[14] MERLIN M M C,GREEN T C,MITCHESON P D,et al. The alternate arm converter:a new hybrid multilevel converter with DC-fault blocking capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2014,29(1):310-317.

[15] 曹冬明,谢晔源,邵震霞,等. 一种直流输电保护装置、换流器及保护方法:CN104009446A[P]. 2014-02-27.

[16] 阙波,李继红,汪楠楠,等. 基于桥臂阻尼的柔性直流故障快速恢复方案[J]. 电力系统自动化,2016,40(24):85-91.
QUE Bo,LI Jihong,WANG Nannan,et al. Research on DC faults fast recovery technology of VSC-HVDC based on bridge-arm damping[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(24):85-91.

[17] 丁云芝,苏建徽,周建. 基于钳位双子模块的 MMC 故障清除和重启能力分析[J]. 电力系统自动化,2014,38(1):97-103.
DING Yunzhi,SU Jianhui,ZHOU Jian. Function-integrated design of load shedding implementation station and automatic switchover based on stability control platform[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(1):97-103.

[18] 王姗姗,周孝信,汤广福,等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过电流分析[J]. 中国电机工程学报,2011,31(1):1-7.
WANG Shanshan,ZHOU Xiaoxin,TANG Guangfu,et al. Analysis of sub module over current caused by DC pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(1):1-7.

[19] 吴方劼,马玉龙,梅念,等. 舟山多端柔性直流输电工程主接线方案设计[J]. 电网技术,2014,38(10):2651-2657.
WU Fangjie,MA Yulong,MEI Nian,et al. Design of main connection scheme for Zhoushan flexible multi-terminal HVDC transmission project[J]. Power System Technology,2014,38(10):2651-2657.

[20] 李亚男,蒋维勇,余世峰,等. 舟山多端柔性直流输电工程系统设计[J]. 高电压技术,2014,40(8):2490-2496.
LI Yanan,JIANG Weiyong,YU Shifeng,et al. System design of Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC transmission project[J]. High Voltage Engineering,2014,40(8):2490-2496.

作者简介:

司志磊

司志磊(1987—),男,河南安阳人,工程师,硕士,研究方向为柔性直流输电系统分析与设计、系统控制策略设计(**E-mail**:hfutszl@163.com);

陆　翌(1979—),男,浙江嘉兴人,高级工程师,博士,主要研究方向为高压直流输电和柔性直流输电;

韩　坤(1983—),男,江苏徐州人,工程师,硕士,主要研究方向为柔性直流输电系统分析与控制;

范彩云(1973—),女,河南许昌人,高级工程师,硕士,主要从事直流输电换流阀研发和工程应用方面的工作;

夏克鹏(1985—),男,山东淄博人,工程师,硕士,主要从事柔性直流输电换流阀研发和工程应用方面的工作;

胡四全(1976—),男,河南信阳人,高级工程师,硕士,主要从事柔性直流输电阀控系统设计方面的工作。

(下转第 74 页 continued on page 74)

作者简介：

陈碧云(1978—)，女，广西北海人，副教授，博士，主要研究方向为电力系统可靠性分析与规划(**E-mail**：chenbiyu@gxu.edu.cn)；

丁 晋(1992—)，男，四川泸州人，硕士研究生，主要研究方向为电力系统可靠性分析与规划(**E-mail**：ding_jin1992@foxmail.com)；

陈碧云

陈绍南(1987—)，男，广西桂平人，博士，主要研究方向为电力系统可靠性分析与规划以及风电相关性分析(**E-mail**：451310528@qq.com)。

Selection of key incentives for power production safety accidents based on association rule mining

CHEN Biyun[1], DING Jin[1], CHEN Shaonan[2]

(1. Guangxi key Laboratory of Power System Optimization and Energy Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China;
2. Guangxi Power Grid Electric Power Research Institute, Nanning 530023, China)

Abstract: With the development of smart grid, communication network and power production safety accident analysis level, the data of power production safety accident is growing exponentially with more complexity, which gradually forms the big data of accidents in electric power production. In order to classify and identify the causes of accidents effectively and reliably on the basis of a large amount of prior accident data, the association rule mining is adopted to select the key incentives of power production safety accident. The incentive analysis system of power production safety accident is established according to the characteristics of accidents. Boolean discretization is carried out to different type of accidents, the calculation method for incentive degree of accident causes is proposed based on association rule mining, the Apriori algorithm is adopted for deep association rules mining, and the key causes are selected and analyzed based on the strong association rules. The validity of the proposed method is verified by the analysis of 5-year regional accident cases.

Key words: power production safety accidents; incentive degree; association rules; Apriori algorithm

(上接第67页 continued from page 67)

Fast fault clearance and system recovery technology of MMC based on bridge-arm damping valve groups

SI Zhilei[1,2], LU Yi[3], HAN Kun[1,2], FAN Caiyun[1,2], XIA Kepeng[1,2], HU Siquan[1,2]

(1. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 2. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China;
3. State Grid Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310000, China)

Abstract: The scheme based on the bridge-arm damping valve groups is introduced to solve the technical problems of flexible HVDC fast fault clearance and system recovery. Based on the mechanism analysis of flexible HVDC pole-to-pole short circuit fault and bridge-arm short circuit fault, the specific electrical topology of the bridge-arm damping valve groups available for engineering, the control and protection strategy of damping valve groups, the selection principle of bridge-arm damping parameters and the design process of engineering parameters are proposed. A multi-terminal flexible-HVDC project is taken for example, and its simulative results show that, when the flexible HVDC pole-to-pole short circuit fault occurs, the proposed scheme can accelerate the attenuation of the DC short circuit current and realize fast restart of system after the fault clearance, and when the bridge-arm short circuit fault occurs, the proposed scheme can accelerate the attenuation of the DC component in the valve-side AC current, accelerate the breaking process of AC switches and reduce the failure risk of converter valves. The effectiveness and feasibility of the proposed scheme are verified.

Key words: modular multilevel converter; bridge-arm damping valve groups; DC faults; bridge-arm short circuit fault; fault clearance; fast recovery; restart