



电网技术
Power System Technology
ISSN 1000-3673, CN 11-2410/TM

《电网技术》网络首发论文

题目：混合级联直流输电系统换流变和应涌流的产生机理、影响及抑制措施
作者：郑涛，薛雨婷，郑璐，潘志远
收稿日期：2024-04-09
网络首发日期：2024-06-17
引用格式：郑涛，薛雨婷，郑璐，潘志远. 混合级联直流输电系统换流变和应涌流的产生机理、影响及抑制措施[J/OL]. 电网技术.
<https://link.cnki.net/urlid/11.2410.tm.20240614.1706.005>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

混合级联直流输电系统换流变和应涌流的产生机理、影响及抑制措施

郑 涛 薛雨婷 郑 璐 潘志远

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

Generation mechanism, influence and suppression scheme of sympathetic inrush current of converter transformer in hybrid cascade HVDC

ZHENG Tao, XUE Yuting, ZHENG Lu, PAN Zhiyuan

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources
(North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: Hybrid cascaded HVDC system combines the advantages of modular multilevel converter (MMC) and line commutated converter (LCC), which can achieve the improvement of system topology and economic performance. It has a broad application prospect, but because of the complex coupling characteristic relationship between the inverter LCC and MMC, the fault of MMC will have a certain impact on the LCC. In this paper, it is firstly analyzed that when a single-phase grounding fault occurs on the valve side of MMC converter transformer, the winding current on the grid side and the valve side contain DC component, and it is proved by formula deduction that the DC component in MMC will cause the voltage distortion of the LCC AC bus, resulting in the DC bias of the magnetic flux of LCC converter transformer's core and inducing sympathetic inrush current. Secondly, on this basis, because of the high second harmonic content of sympathetic inrush current, the sensitivity of differential protection decreases or even refuses to move when LCC converter transformer occurs an inter-turn fault, and corresponding measures are proposed to restrain sympathetic inrush current. Finally, simulation based on PSCAD/EMTDC platform is carried out to verify the correctness of the theoretical analysis.

KEY WORDS: converter transformer; DC component; sympathetic inrush current; inter-turn fault; differential protection

摘要: 综合电网换相换流器(line commutated converter, LCC)和模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)多类优点的混合级联直流输电系统, 可以实现系统拓扑结构

及经济性能的改善, 具有广阔的发展前景, 但是由于逆变侧 LCC 与 MMC 之间存在复杂的耦合特性关系, MMC 换流变阀侧发生故障可能会对逆变侧 LCC 产生一定影响。该文首先分析 MMC 发生单相接地故障时, 其网侧、阀侧绕组电流含有大量的直流分量, 并通过公式推导证明了 MMC 中的直流分量会引起 LCC 交流母线电压畸变, 从而导致 LCC 换流变铁芯磁通产生直流偏置, 引发和应涌流; 其次, 在此基础上研究因和应涌流二次谐波含量较高, 导致 LCC 换流变匝间故障时差动保护出现灵敏度下降甚至拒动的问题, 并对此提出相应的抑制 LCC 和应涌流的措施; 最后, 基于 PSCAD/EMTDC 平台进行仿真, 验证了理论分析的正确性。

关键词: 换流变压器; 直流分量; 和应涌流; 匝间故障; 差动保护

DOI:

0 引言

综合电网换相换流器(line commutated converter, LCC)和模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)多类优点的混合级联直流输电系统, 为高压直流输电领域发展开辟了新方向^[1-5], 其优势具体可表现为: (1)可通过 LCC 强制移相隔离直流侧故障^[6]; (2)可通过 MMC 提供无功及电压支撑, 抑制换相失败; (3)受端可形成多落点, 提高系统稳定性^[7]。

目前国内外学者对混合级联直流输电系统的研究大多集中于交直流故障特性及协调控制策略^[8]。文献[9-10]分析了 LCC-MMC 混合直流系统整流侧发生交流故障导致换相电压降低, 从而引起功率骤降的问题, 对此分别提出不同故障协调控制策略以

基金项目: 国家自然科学基金项目(52377099)

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(NSFC,52377099).

降低逆变侧直流电压，维持直流电流恒定，确保直流系统有功功率的传输能力。文献[11]针对混合级联直流输电系统逆变侧 LCC 交流故障引起功率反送及 MMC 交流故障引起过压过流的问题，提出 MMC1 及 MMC2/3 站分别采用不同电压控制方式的故障协调控制策略。文献[12]分析了混合级联直流输电系统发生直流故障时，逆变侧 MMC 因电流分配不均导致过电流以及故障清除后系统特性量波动大造成不良影响的问题，并提出故障期间及故障清除后的控制策略。

换流变压器(简称“换流变”)作为交直流输电系统中连接交流侧与直流侧的重要设备，其阀侧与换流器连接的穿墙套管可能因绝缘破损而导致阀侧接地故障，且其故障特性相较于交直流故障特性更为复杂，可能会对换流变本体及交直流混联电网产生影响。目前已有文献针对 LCC-HVDC 及 MMC-HVDC 系统换流变阀侧接地故障展开研究。文献[13-14]分析了 LCC-HVDC 系统换流变阀侧单相接地故障引起故障性涌流的机理，并对换流变差动保护误闭锁的情况提出相应的保护改进方案。文献[15]推导了 MMC-HVDC 系统换流变阀侧发生单相及三相接地故障时其桥臂电流表达式，同时提及阀侧故障会导致 MMC 上桥臂过电压及下桥臂过电流的问题。

混合级联直流输电系统相较于 LCC-HVDC 及 MMC-HVDC 系统，因其逆变侧 LCC 与 MMC 之间存在复杂的电气耦合关系^[16]，换流变阀侧单相接地故障特性将更为复杂，但目前尚未有文献对此进行分析，故亟需对混合级联直流输电系统换流变阀侧单相接地故障展开深入研究。

此外，换流变还存在一种复杂的涌流现象——和应涌流^[17]，目前已有文献深入分析换流变和应涌

流对差动保护的影响及其抑制措施。文献[17-19]分析了 LCC-HVDC 系统换流变空充引起和应涌流的机理及其对直流系统的影响，提出采用同期合闸装置抑制和应涌流的方案。文献[20]分析了 LCC-HVDC 系统换流变和应涌流含有大量二次谐波，流经换流器耦合为 50Hz 分量，可能引起直流 50Hz 保护误动，并对此提出相关建议。混合级联直流输电系统逆变侧 LCC 换流变、MMC 换流变及其与电网之间存在复杂的电气耦合关系，其中一台换流变故障可能引起其他换流变产生和应涌流，但目前尚未有文献分析混合级联直流输电系统换流变和应涌流，故亟需对其展开深入研究。

本文以国内首个混合级联直流输电工程——白鹤滩-江苏±800 千伏特高压直流输电工程的受端换流站为研究对象，分析了在 MMC 换流变阀侧发生单相接地故障时，LCC 换流变和应涌流的产生机理及其特征；并进一步研究 LCC 换流变和应涌流对其差动保护的影响，指出因和应涌流二次谐波含量较高造成 LCC 换流变匝间故障时差动保护灵敏度下降甚至拒动的问题，进而提出相应的抑制 LCC 和应涌流的措施；最后基于 PSCAD/EMTDC 平台搭建混合级联直流输电系统的仿真模型，通过大量仿真，验证了本文理论分析的正确性及所提抑制措施的有效性。

1 混合级联直流输电系统基本结构

以白鹤滩-江苏±800 千伏特高压直流输电工程拓扑结构为参考，其单极结构拓扑图如图 1 所示，控制方式见附录 A。

整流站采用 2 组双 12 脉动 LCC 串联结构，逆变站采用 1 组双 12 脉动 LCC 与 3 个并联的 MMC 站串联结构。双 12 脉动 LCC 的拓扑图如图 2 所示。

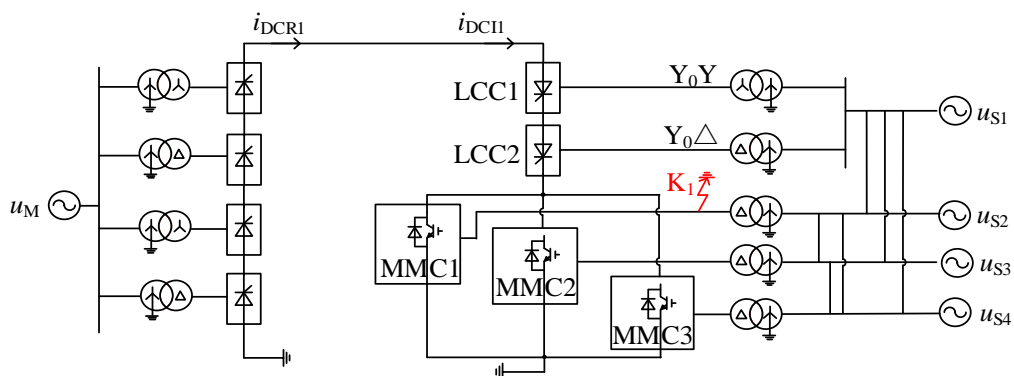


图 1 ±800 kV 混合级联直流输电系统单极结构图

Fig.1 Unipolar structure diagram of ±800 kV hybrid cascaded HVDC project

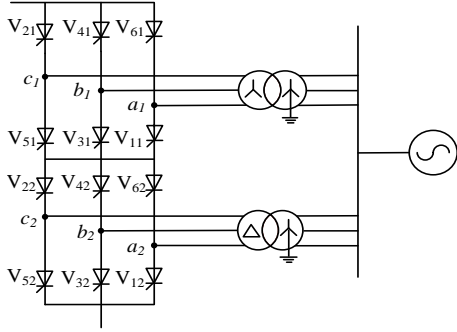


图2 双12脉动LCC拓扑图

Fig. 2 Topology of double 12 pulsation LCC

单个MMC及单一子模块(sub module, SM)拓扑图如图3所示。由图可知单一子模块由直流侧电容器(C_0)、一对反并联二极管(D、D')以及两个IGBT(VT1、VT2)组成。

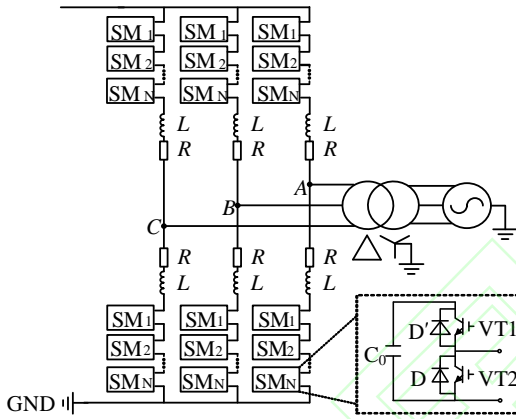


图3 单个MMC拓扑图

Fig. 3 Topology of single MMC

2 MMC换流变阀侧故障引起LCC和应涌流的产生机理及特征

2.1 MMC换流变阀侧接地故障特性分析

以MMC1换流变阀侧A相接地故障(如图1中故障 K_1 所示)为例,由于故障导致上、下桥臂中点处电压降低,上、下桥臂子模块中的电容将分别充电,故障回路电流将迅速增长,约3~5ms后^[21],IGBT因过流保护动作而将闭锁^[22]。

IGBT闭锁后,上桥臂通过二极管继续对电容充电,待电容充电达到最大值后,上桥臂故障回路电流降为零,下桥臂故障相回路电流逐渐衰减至零,非故障相回路的二极管将在其上、下桥臂中点电压小于零时导通,桥臂电流幅值大且衰减缓慢,故流向换流变阀侧的电流主要是下桥臂非故障相回路电流。

IGBT闭锁后的MMC1上、下桥臂电流示意图如图4所示,图中 i_{vx} 为换流变阀侧电流, i_{gx} 为换流变网侧电流($x=a, b, c$),规定电流流入换流变为正

方向。

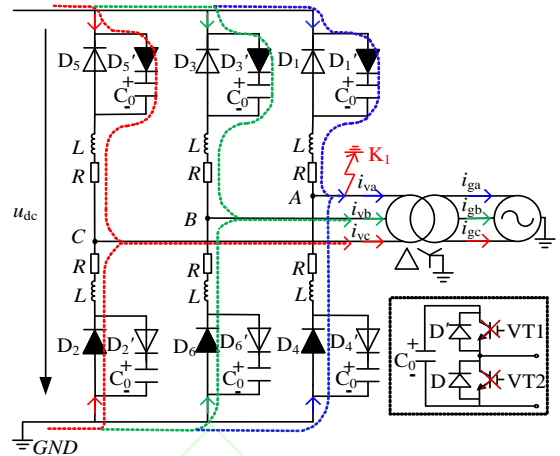
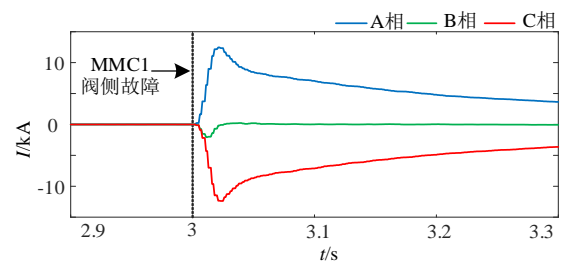


图4 IGBT闭锁后MMC1上、下桥臂电流示意图

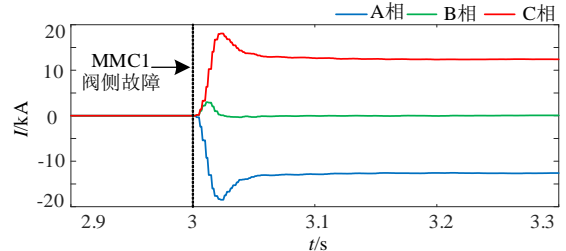
Fig.4 Current diagram of MMC1 upper and lower arm after IGBT being locked

由于换流变阀侧绕组为角接,故A、C相阀侧绕组电流直流分量分别为负、正,B相阀侧绕组电流直流分量为零,如图5(a)所示,其中,故障时刻 t 为3s。直流电流会导致MMC1换流变铁芯磁通产生直流偏置,随着直流磁通不断积累,铁芯会逐渐饱和,从而产生故障性涌流,其中A相、C相故障相涌流分别为负、正,而B相无故障性涌流^[23]。

经上述分析可知,MMC1换流变阀侧A相绕组电流直流分量为负,根据法拉第电磁感应定律同时结合换流变铁芯磁通不能突变可知,换流变网侧A相绕组电流的直流分量为正,同理,换流变网侧C相绕组电流的直流分量为负,网侧B相绕组电流直流分量为零,如图5(b)所示。



(a)MMC1换流变阀侧绕组电流直流分量



(b)MMC1换流变网侧绕组电流直流分量

图5 MMC1换流变阀侧、网侧绕组直流分量示意图

Fig.5 DC component of side winding current of the converter transformer's network and value side

2.2 LCC 换流变和应涌流的产生机理及特征

LCC1、LCC2 及 MMC1 换流变网侧等效示意图如图 6 所示，图中黑色箭头表示规定的电流正方向，红色箭头表示电流的实际流向。

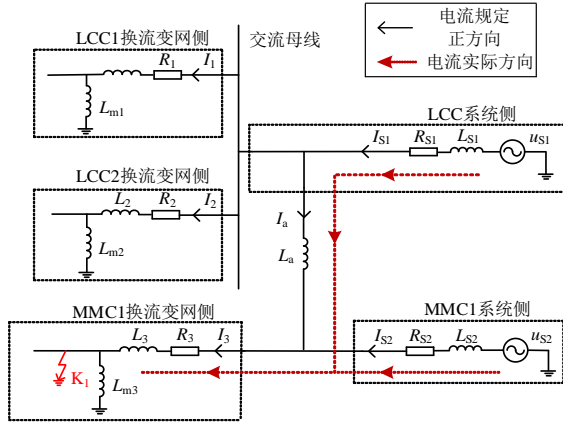


图 6 LCC1、LCC2 及 MMC1 换流变网侧等效示意图

Fig.6 Equivalence diagram of LCC1, LCC2 and MMC1 converter transformer's network side

图中 I_{S1} 、 I_{S2} 分别为逆变侧 LCC、MMC1 的系统电流， I_n 表示 LCCn 网侧绕组电流($n=1, 2$)， I_3 表示 MMC1 的网侧绕组电流， I_a 为 MMC1 与逆变侧 LCC 系统之间的电流。

经 2.1 节分析，MMC1 换流变阀侧 A 相发生接地故障后，其网侧 A 相绕组电流存在极性为正的直流分量，此电流应由作为“源”的 LCC、MMC 系统侧提供，故 I_{S1} 、 I_{S2} 、 I_a 中 A 相电流的直流分量极性为正，同时因电流 I_{S1} 直流分量流经 LCC 系统侧阻抗，导致 LCC 交流母线电压畸变，必然会引起 LCC1 及 LCC2 换流变的磁链变化^[24]。

由 LCC 系统侧及 LCC1 换流变网侧组成的回路的电压方程表达式如式(1)所示：

$$\frac{d\Psi_{m1}}{dt} = u_{S1} - R_{S1}I_{S1} - L_{S1}\frac{dI_{S1}}{dt} - R_1I_1 - L_1\frac{dI_1}{dt} \quad (1)$$

对式(1)进行积分可得 LCC1 换流变磁链的周期变化量，如式(2)所示：

$$\begin{aligned} \Delta\Psi_{m1} &= \int_{t+T}^t (u_{S1} - R_{S1}I_{S1} - L_{S1}\frac{dI_{S1}}{dt} - R_1I_1 - L_1\frac{dI_1}{dt})dt \\ &= -R_{S1}\int_t^{t+T} I_{S1f}dt - L_{S1}[I_{S1f}]_t^{t+T} - R_1\int_t^{t+T} I_{1f}dt - L_1[I_{1f}]_t^{t+T} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 Ψ_{m1} 、 $\Delta\Psi_{m1}$ 分别为 LCC1 换流变磁链及其一个周期内的变化量， L_{S1} 、 R_{S1} 分别为 LCC 系统侧电感、电阻， L_1 、 R_1 分别为 LCC1 换流变网侧电感、电阻， I_{S1f} 、 I_{1f} 分别为 I_{S1} 、 I_1 中的直流分量， I_{S1f} 为正值， I_{1f} 为负值。

结合此模型逆变侧 LCC 的系统参数及 LCC1

换流变参数^[25]可知， $\Delta\Psi_{m1}$ 为负值，即一个周期内，LCC1 换流变 A 相铁芯磁通产生负的直流偏置，同理，C 相铁芯磁通将产生正的直流偏置，B 相铁芯磁通正负半波对称，无直流偏置。直流偏磁的存在会导致换流变铁芯工作点进入饱和区，从而引发和应涌流，且随着铁芯饱和程度的加深，和应涌流幅值会逐渐增大。A 相和应涌流极性为负，C 相和应涌流极性为正，B 相电流即为换流变正常工作时正负半波对称的励磁电流。同理，LCC2 换流变也会产生和应涌流且其极性情况与上述分析相同，故下文仅以 LCC1 换流变为例进行分析。

由于 MMC1 换流变网侧绕组电流的直流分量呈逐渐衰减的趋势，故作为“源”的逆变侧 LCC 系统电流 I_{S1} 的直流分量也应逐渐衰减，从而导致 LCC 交流母线电压的畸变量逐渐减小，引起 LCC1 换流变铁芯磁通变化量逐渐减小，但又因铁芯磁通不能突变，因此铁芯磁通应先增大至最大值再逐渐衰减，LCC1 换流变的 A、C 相和应涌流也应呈现先增大至最大值再逐渐衰减的趋势，同时由于换流变铁芯半周进入饱和区，和应涌流含有明显的间断角。

3 和应涌流对换流变差动保护的影响及抑制措施

3.1 和应涌流对换流变差动保护的影响

换流变压器一般采用基于二次谐波制动原理的差动保护，其动作方程如式(3)所示。式中 i_1 和 i_2 分别为换流变压器网侧及换算至网侧的阀侧电流； I_{op} 为最小动作门槛，一般取 $(0.2\sim 0.5)I_N$ ； K 为制动系数，本文 K 取 0.5。

$$\begin{cases} |i_1 + i_2| > K|i_1 - i_2|/2 \\ |i_1 + i_2| > I_{op} \end{cases} \quad (3)$$

LCC 换流变差动保护接线图如图 7 所示，图中 TA1、TA2 分别表示网侧及阀侧 CT，均安装在换流变绕组上。

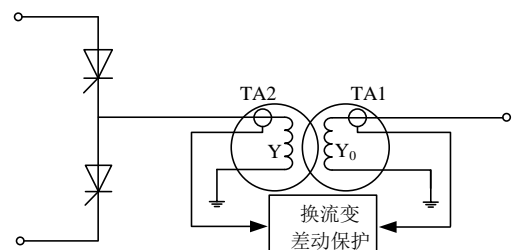


图 7 LCC1 换流变差动保护接线图

Fig.7 Converter transformer differential protection wiring diagram of LCC1

经第2节分析可知,MMC1换流变阀侧单相接地故障会引起LCC1换流变产生和应涌流,若此时LCC1换流变发生匝间故障,换流变差动保护应可靠动作。考察此时LCC1换流变的差动电流 $|i_1 + i_2|$ 即为由MMC1换流变阀侧故障引发的LCC1和应涌流叠加本体匝间故障引起的励磁电流,其二次谐波含量可能较大,从而造成换流变差动保护延迟动作或拒动。

3.2 和应涌流的抑制措施

根据3.1节分析可知,和应涌流可能导致LCC1换流变匝间故障时差动保护延迟动作甚至拒动,现提出在MMC1下桥臂并联“旁路晶闸管对”的措施以抑制和应涌流,如图8所示。

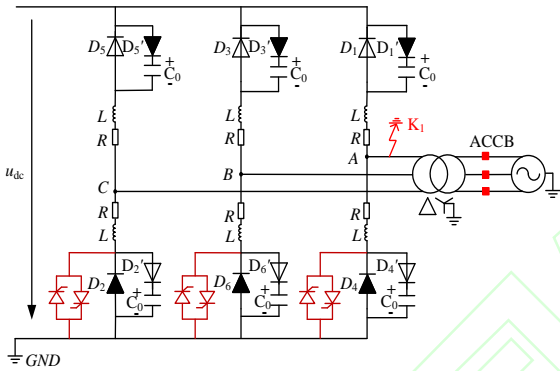


图8 加装“旁路晶闸管对”的MMC1拓扑图
Fig.8 MMC1 topology with “bypass thyristor pairs”

旁路晶闸管正常工作时处于关断状态,在MMC1换流变阀侧发生单相接地故障后,SM中IGBT被闭锁的同时立即触发晶闸管使其导通,人为构造三相短路,使得下桥臂非故障相电流存在正、负方向的电流通路,从而大幅度降低流向换流变阀侧故障电流的直流分量。上述操作结束后,流过网侧交流断路器(ac circuit breaker, ACCB)的电流一旦过零,立即将其断开。

此措施使得流向换流变阀侧的直流分量大幅度降低,从而加速网侧交流断路器电流过零断开^[26-27],不仅可削弱LCC交流母线电压畸变程度,降低LCC1换流变铁芯磁通的直流偏置,抑制和应涌流,提高换流变匝间故障时差动保护正确动作的可靠性,还可有效抑制阀侧接地故障引起的MMC1换流变故障性涌流,并解决阀侧直流分量导致网侧交流断路器无法快速断开以切除故障的问题^[28-29]。

4 仿真验证

为验证本文分析的正确性,参考白鹤滩-江苏±800千伏特高压直流输电工程,基于PSCAD/EMTDC平台搭建仿真模型,仿真参数如表

1所示。

表1 仿真参数

Tab.1 Parameters of simulation system	
参数	数值
额定容量/MW	4000
直流侧额定电压/kV	800
联接变压器容量/MVA	1200
联接变压器变比 kV/kV	510/165
联接变压器漏抗/pu	0.18
每个桥臂子模块数量/个	200
子模块等效电容/mF	10

下面对MMC1闭锁前、后的下桥臂电流、LCC1和应涌流及其对换流变匝间故障时差动保护的影响和抑制措施进行仿真分析。

4.1 MMC1 阀侧接地故障特性仿真分析

MMC1换流变阀侧A相接地故障时间设置为3.0s, IGBT过流保护整定值为1.4pu。

IGBT闭锁前的下桥臂电流波形如图9所示,可以看出故障后下桥臂电容放电,电流迅速增大,约3ms时IGBT闭锁,与理论分析一致。

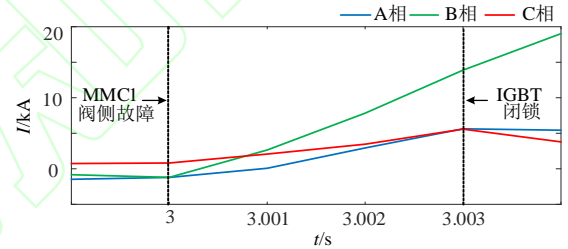


图9 闭锁前下桥臂电流

Fig. 9 Pre-blocking current of lower arm

闭锁后下桥臂电流波形如图10所示,可以看出故障后下桥臂故障相回路电流逐渐衰减到零,非故障相在上下桥臂中点处电压为负时导通,且电流幅值较大、衰减缓慢,与理论分析一致。

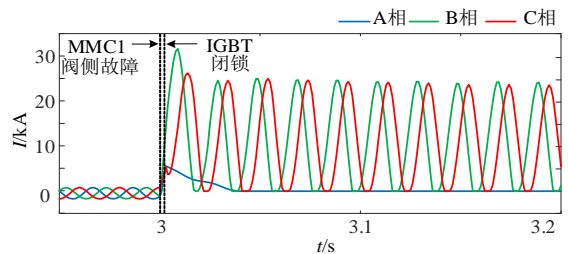
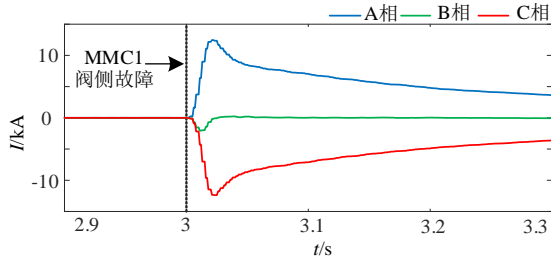


图10 闭锁后下桥臂电流

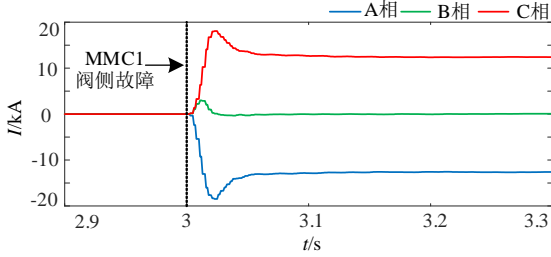
Fig. 10 Post-blocking current of lower arm

4.2 和应涌流的仿真分析

MMC1换流变阀侧单相接地故障导致其网侧、阀侧绕组中直流电流含量大,如图11(a)、(b)所示。由图可知,网侧、阀侧绕组直流电流极性相反,与理论分析一致。



(a)MMC1换流变网侧绕组电流直流分量

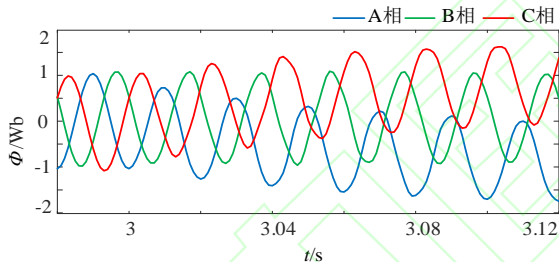


(b)MMC1换流变网侧绕组电流直流分量

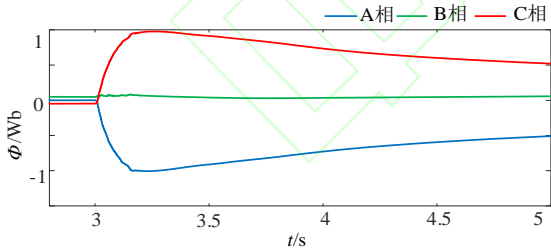
图 11 MMC1 换流变网侧、阀侧绕组电流直流分量

Fig.11 DC component of side winding current of MMC1 converter transformer's network and value side

LCC1 换流变铁芯的主磁通及其直流偏置分别如图 12(a)、(b)所示。A 相磁通偏向时间轴上方，直流偏置为正，C 相磁通偏向时间轴下方，直流偏置为负，B 相磁通无直流偏置，与理论分析一致。



(a)主磁通



(b)磁通直流分量

图 12 LCC1 换流变主磁通及其直流偏置

Fig.12 Magnetic flux and its DC component of LCC1 converter transformer

LCC1 换流变和应涌流波形图如图 13 所示，可以看出涌流含有很大的直流分量，且有明显的间断角，A 相涌流偏向于时间轴下方，C 相涌流偏向于时间轴上方，B 相无涌流，与理论分析一致。

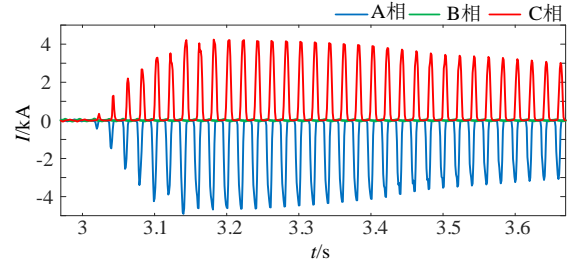


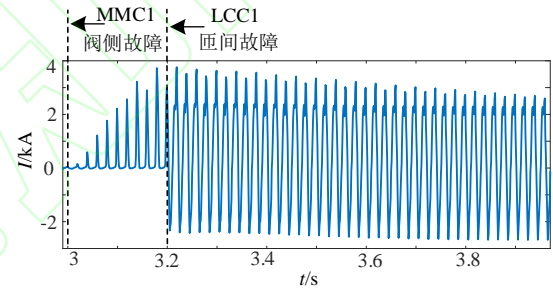
图 13 LCC1 换流变和应涌流

Fig.13 Sympathetic inrush current of LCC1 converter transformer

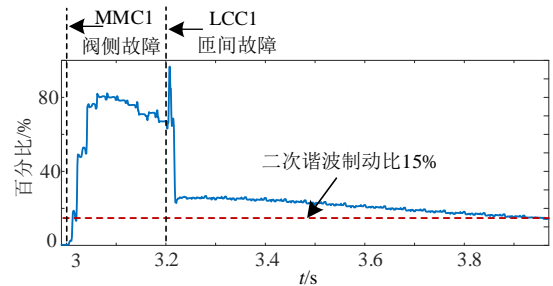
4.3 和应涌流对换流变差动保护影响的仿真分析

通过分析可知由于和应涌流的二次谐波含量较大，可能导致 LCC1 换流变匝间故障时差动保护延迟动作或拒动。下面对 LCC1 换流变匝间故障时差动保护的動作特性进行仿真分析。

LCC1 换流变匝间故障时间设置为 3.2s，匝间故障时 LCC1 换流变差动电流及其二次谐波占比示意图分别如图 14(a)、(b)所示。



(a) 差动电流



(b) 差动电流二次谐波占比

图 14 LCC1 换流变差动电流及其二次谐波占比

Fig.14 Differential current and its second harmonic ratio of LCC1 converter transformer

通过仿真分析可知，LCC1 换流变发生匝间故障后，差动电流进入动作区，初始阶段差动电流的二次谐波含量远大于保护设定值 15%，差动保护不动作；随着和应涌流逐渐衰减，差动电流二次谐波含量逐渐低于 15%，导致差动保护延时动作。

4.4 抑制和应涌流措施的仿真分析

由 3.2 节提出的和应涌流抑制措施可知，在 MMC1 下桥臂并联“旁路晶闸管对”，可使得下桥

臂流向换流变阀侧的直流分量大幅度降低,抑制和应涌流的产生。

实施抑制措施后的 LCC1 换流变励磁电流如图 15 所示,将其与图 13 所示的和应涌流对比分析可知,换流变励磁电流未发生畸变,此措施可有效抑制和应涌流产生,与理论分析一致。

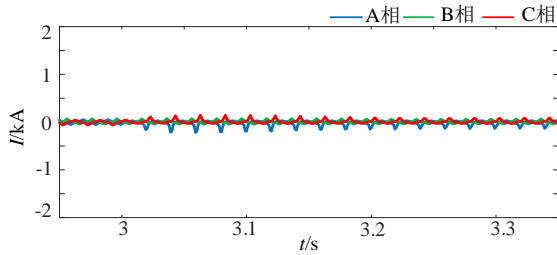


图 15 实施抑制措施后的 LCC1 换流变励磁电流
Fig.15 Magnetizing current of LCC1 converter transformer after the implementation of suppression measure

实施抑制措施后的 LCC1 换流变差动电流及其二次谐波占比示意图分别如图 16(a)、(b)所示,将其与图 14(a)、(b)对比可知,由于和应涌流得到有效抑制, LCC1 换流变发生匝间故障后,差动电流进入动作区且其二次谐波含量很快低于 15%,差动保护可靠动作。

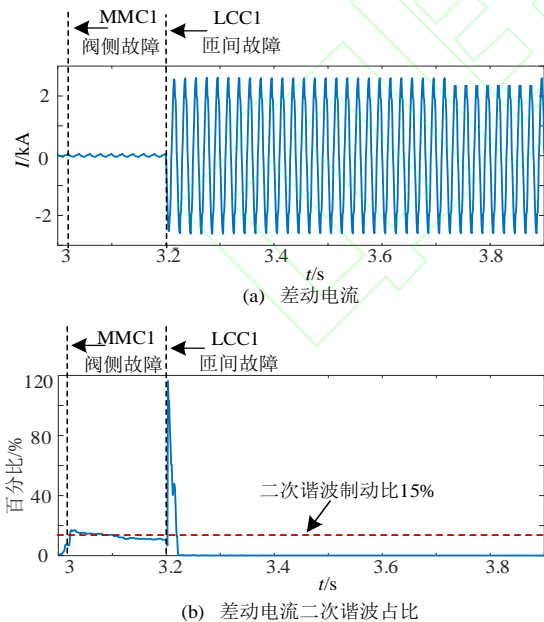


图 16 实施抑制措施后的 LCC1 换流变差动电流及其二次谐波占比

Fig.16 Differential current and its second harmonic ratio of LCC1 converter transformer after the implementation of suppression measure

5 结论

本文针对混合级联直流输电系统中 MMC 换流变阀侧单相接地故障可能引发逆变侧 LCC 换流变和应涌流的问题,以 MMC1 换流变阀侧发生单相接地故障为例,分析 IGBT 闭锁前后 MMC1 上、下桥臂电流的故障特征,进一步研究 LCC1 换流变和应涌流的产生机理及其对 LCC1 换流变匝间故障时差动保护的影响,并提出相应的抑制和应涌流的措施,得到的主要结论如下:

1) MMC1 换流变阀侧单相接地故障导致其网侧、阀侧绕组直流电流含量大,从而导致 LCC 交流母线电压畸变,引起 LCC1 换流变铁芯磁通产生直流偏置,引发和应涌流。

2) 由于和应涌流的二次谐波含量较大,可能导致 LCC1 换流变发生匝间故障时,其差动电流二次谐波含量超过保护设定值 15%的时间较长,造成差动保护延迟动作或拒动。

3) 在 MMC1 下桥臂并联“旁路晶闸管对”,可大幅度降低 MMC1 中的直流分量,从而降低 LCC1 换流变直流偏磁,抑制和应涌流,提高 LCC1 换流变匝间故障时差动保护正确动作的可靠性。

参考文献

- [1] 王鹤,郭家治,边竞,等.基于故障安全域的混合级联直流输电系统后续换相失败抑制策略[J].电工技术学报,2024,39(05):1352-1371.
Wang He, Guo Jiazi, Bian Jing, et al. Subsequent commutation failure suppression Strategy for hybrid cascaded HVDC Systems based on Fault safety domain [J]. Transactions of China Electrotechnical Society. 2019. 39(05):1352-1371.
- [2] 徐政,王世佳,李宁璨,等.适用于远距离大容量架空线路的 LCC-MMC 串联混合型直流输电系统[J].电网技术,2016,40(1):55-63.
XU Zheng, Wang Shijia, Li Ningcan, et al. A LCC and MMC series hybrid HVDC topology suitable for bulk power overhead line transmission[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 55-63(in Chinese).
- [3] XU Zheng, WANG Shijia, XIAO Huangqing. Hybrid high-voltage direct current topology with line commutated converter and modular multilevel converter in series connection suitable for bulk power overhead line transmission[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(12): 2307-2317.
- [4] GUO Chunyi, WU Zhangxi, YANG Shuo, et al. Overcurrent suppression control for hybrid LCC/VSC cascaded HVDC system based on fuzzy clustering and identification approach[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(3): 1745-1753.
- [5] 刘泽洪,王绍武,种芝艺,等.适用于混合级联特高压直流输电系统的可控自恢复消能装置[J].中国电机工程学报,2021,41(2):514-523.
LIU Zehong, WANG Shaowu, CHONG Zhiyi, et al. Controllable and adaptive energy absorption device for hybrid cascaded UHVDC transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 514-

- 523(in Chinese).
- [6] 郭春义, 赵成勇, 彭茂兰, 等. 一种具有直流故障穿越能力的混合直流输电系统[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4345-4352.
Guo Chunyi, Zhao Chengyong, Peng Maolan, et al. A Hybrid DC Transmission System with DC Fault Crossing Capability [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4345-4352.
 - [7] 郝亮亮, 詹清清, 陈争光, 等. LCC-MMC 型混合直流送端交流系统故障时直流电流的暂态过程解析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(09): 220-227.
Hao Liangliang, Zhan Qingqing, Chen Zhengguang, et al. Analysis of Transient Process of DC Current in LCC-MMC Hybrid DC Feeder AC System Fault [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(09): 220-227.
 - [8] 郭春义, 吴张曦, 赵成勇. 特高压混合级联直流输电系统中多 MMC 换流器间不平衡电流的均衡控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6653-6663.
Guo Chunyi, Wu Zhangxi, Zhao Chengyong. Balancing Control Strategy of unbalanced current between multiple MMC converters in UHV Hybrid Cascade HVDC Transmission System [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6653-6663.
 - [9] 刘志超, 时伯年, 刘斌, 等. 基于最大调制比的 LCC-MMC 混合直流交流侧故障控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(04): 125-130.
Liu Zhi-Chao, Shi Bo-nian, Liu Bin, et al. LCC-MMC Hybrid DC AC Fault Control Strategy Based on Maximum modulation Ratio [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(04): 125-130.
 - [10] 李国庆, 姜伟涛, 辛业春, 等. LCC-MMC 型混合直流输电系统送端交流故障穿越控制策略[J]. 电网技术, 2021, 45(07): 2586-2595.
Li Guoqing, Lou Weitao, Xin Yechun, et al. AC fault Crossing Control Strategy for LCC-MMC Hybrid HVDC Transmission System [J]. Power Grid Technology, 2019, 45(07): 2586-2595.
 - [11] 邓楠, 郝亮亮, 和敬涵, 等. 受端混联型多端直流输电系统逆变侧交流故障特性分析及协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(10): 54-64.
Deng Nan, Hao Liangliang, He Jinghan, et al. Analysis of AC Fault characteristics and Coordinated control Strategy for inverting side of Hybrid Receiving multi-terminal HVDC System [J]. Power System Protection and Control, 2019, 51(10): 54-64.
 - [12] 杨硕, 郑安然, 彭意, 等. 混合级联型直流输电系统直流故障特性及恢复控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(09): 166-172+179.
Yang Shuo, Zheng Anan, Peng Yi, et al. DC fault characteristics and recovery control strategy of Hybrid Cascade HVDC System [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(09): 166-172+179.
 - [13] 郑涛, 胡鑫. 特高压换流变故障性涌流产生机理及其对差动保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(05): 109-115.
Zheng Tao, Hu Xin. Mechanism of fault inrush flow in UHV rheology and its influence on differential protection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(05): 109-115.
 - [14] 罗美玲, 郑涛, 潘志远, 等. 基于选相投旁通对的 LCC-HVDC 系统逆变侧换流变故障性涌流主动抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(01): 158-164.
Luo Meiling, Zheng Tao, Pan Zhiyuan, et al. Active suppression strategy of rheological fault inrush current in inverting side of LCC-HVDC system based on phase-by-pass pair selection [J]. Power System Protection and Control, 2019, 51(01): 158-164.
 - [15] 单节杉, 任敏, 田鑫萃, 等. MMC 换流站阀侧交流接地故障电流解析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 36-48.
Shanjie Shan, Ren Min, Tian Xinfui, et al. Analysis of AC Ground Fault at Valve Side of MMC Converter Station [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 36-48.
 - [16] 赵薇, 郭春义, 杨硕. 混合级联直流输电系统整流/逆变不同控制回路动态交互作用与稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(01): 231-244.
Zhao Wei, Guo Chunyi, Yang Shuo. Study on Dynamic Interaction and Stability of Different Control loops of rectifier/Inverter in Hybrid Cascade HVDC System [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 44(01): 231-244.
 - [17] 郑伟, 张楠, 周全. 和应涌流导致直流闭锁极保护误动作分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 119-124.
Zheng Wei, Zhang Nan, Zhou Quan. Analysis of misoperation of DC Blocking Electrode Protection caused by inrush Current [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 119-124.
 - [18] 朱韬析, 王超, 张雪松, 项中明. 浅析空载投入换流变压器对直流输电系统的影响[J]. 电力系统自动化, 2007, (23): 108-112.
Zhu Taoqing, Wang Chao, Zhang Xuesong, Xiang Zhongming. Analysis on the influence of no-load converter transformer on DC transmission System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, (23): 108-112.
 - [19] 田庆. 12 脉动换流变压器对称性涌流现象分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (23): 133-137.
Tian Qing. Analysis of symmetrical inrush current in 12 pulsating converter Transformers [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39 (23): 133-137.
 - [20] 李晓华, 张冬怡, 丁晓兵, 等. 换流变压器和应涌流的正序二次谐波特性分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 202-207.
Li Xiaohua, Zhang Dongyi, Ding Xiaobing, et al. Analysis of positive sequence second Harmonic Characteristics of converter transformers and inrush Current [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 202-207.
 - [21] LI Gen, LIANG Jun, MA Fan, et al. Analysis of single-phase-to-ground faults at the valve-side of HB-MMCs in HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3): 2444-2453.
 - [22] 范雪峰, 黄金海, 宋延涛, 等. 柔性直流交流连接区故障分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 151-159.
Fan Xuefeng, Huang Jinhai, Song Yantao, et al. Fault analysis of flexible DC/AC connection area[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 151-159(in Chinese).
 - [23] 郑涛, 何瑞, 刘校销, 等. MMC-HVDC 系统故障性涌流的产生机理及影响[J]. 电网技术, 2022, 46(09): 3550-3559.
Zheng Tao, He Rui, Liu Xiaozhi, et al. Generation mechanism and influence of fault inrush current in MMC-HVDC system [J]. Power Grid Technology, 2022, 46(09): 3550-3559.
 - [24] 李斌, 彭伍龙, 姚斌, 等. 基于复合环流与零序电流特征的换流变压器励磁涌流波形相关性识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 8027-8038+8239.
Li Bin, Peng Wulong, Yao Bin, et al. Correlation identification method of inrush current waveform of converter transformer based on complex circulation and zero sequence current characteristics [J]. Proceedings of the CSEE, 20, 40(24): 8027-8038+8239.
 - [25] 李晓栋. 特高压混合级联直流输电系统的几个关键技术问题研究[D]. 浙江大学, 2023.
Li Xiaodong. Research on Several Key technical Problems of UHV Hybrid Cascade DC transmission system [D]. Zhejiang University, 2023.
 - [26] 周杨, 贺之渊, 庞辉, 等. 双极柔性直流输电系统站内接地故障保护策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4062-4069.
Zhou Yang, He Zhiyuan, Pang Hui, et al. Grounding Fault Protection Strategy for Bipolar Flexible HVDC System [J]. Proceedings of the

- CSEE, 2015, 35(16): 4062-4069.
- [27] G. Li, J. Liang, C. E. Ugalde-Loo, F. Ma, H. Liang and Z. Song. Protection for Submodule Overvoltage Caused by Converter Valve-Side Single-Phase-to-Ground Faults in FB-MMC Based Bipolar HVDC Systems. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(6): 2641-2650.
- [28] 郑涛, 何瑞, 潘志远, 等. MMC-HVDC 换流变压器复杂性涌流产生机理及其影响分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23): 102-108.
Zheng Tao, He Rui, Pan Zhiyuan, et al. Generation Mechanism and Influence analysis of complex inrush current in MMC-HVDC converter transformer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 46(23): 102-108.
- [29] 何瑞. MMC-HVDC 系统下故障性涌流的产生机理及其影响研究[D]. 华北电力大学(北京), 2023.

He Rui. Study on the generation mechanism and influence of fault inrush current in MMC-HVDC system [D]. North China Electric Power University (Beijing), 2023.



郑涛

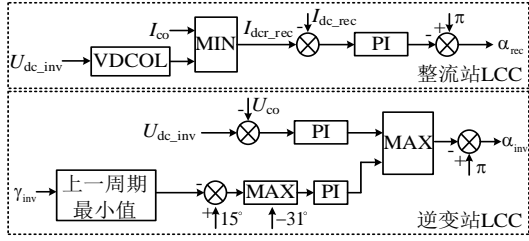
收稿日期: 2024-4-9

作者简介:

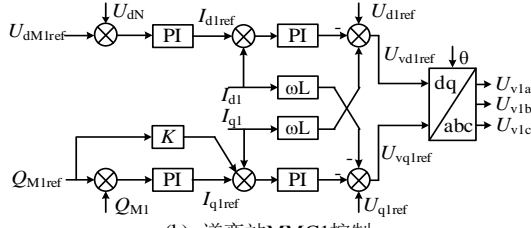
郑涛(1975), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力继电保护, E-mail: zhengtao@ncepu.edu.cn;

薛雨婷(2002), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护, E-mail: 2480465066@qq.com。

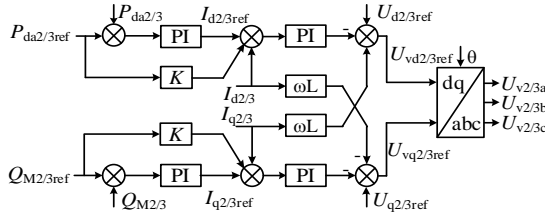
附录 A



(a) 整流站与逆变站LCC控制



(b) 逆变站MMC1控制



(c) 逆变站MMC2/3控制

A1 混合级联直流输电系统控制方式图

A1 Control mode diagram of hybrid cascaded HVDC system

整流侧 LCC 在配有低压限流环节(VDCOL)及最小触发角的基础上采用定直流电流控制, 逆变侧高端 LCC 采用定直流电压及定关断角控制, 如 A1(a)所示。

逆变侧低端三个并联的 MMC 采用主从控制方式, 主站 MMC1 及从站 MMC2/3 分别采用定直流电压及定有功功率控制, 如 A1(b)及 1(c)所示。

Generation mechanism, influence and suppression scheme of sympathetic inrush current of converter transformer in hybrid cascade HVDC

ZHENG Tao, XUE Yuting, ZHENG Lu, PAN Zhiyuan

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources

(North China Electric Power University)

KEY WORDS: converter transformer; DC component; sympathetic inrush current; inter-turn fault; differential protection

The hybrid cascade DC transmission system with multiple advantages of line commutated converter (LCC) and multilevel modular converter (MMC) has become the new direction of HVDC transmission. Due to its complex electrical coupling relationship between LCC and MMC, the grounding fault characteristics of converter transformer valve side will be more complicated.

In this paper, the inverter side of Baihetan-Jiangsu $\pm 800\text{kV}$ UHVDC transmission project is taken as the research object, and the single-phase grounding on the side of MMC1 converter transformer valve is taken as an example for analysis. The equivalent diagram of LCC1, LCC2 and MMC1 converter transformer network on the inverter side is shown in Figure 1.

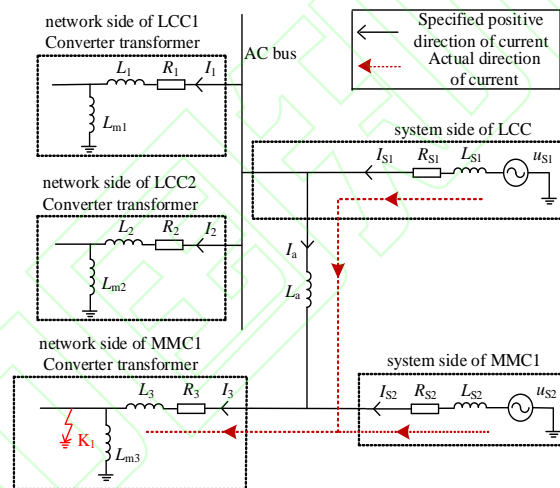


Fig. 1 Equivalence diagram of LCC1, LCC2 and MMC1 converter transformer's network side

The voltage equation of the loop consisting of LCC system side and LCC1 converter transformer network side is shown in equation (1) :

$$\frac{d\Psi_{m1}}{dt} = u_{S1} - R_{S1}I_{S1} - L_{S1} \frac{dI_{S1}}{dt} - R_1I_1 - L_1 \frac{dI_1}{dt} \quad (1)$$

The periodic variation of LCC1 for converter transformer flux linkage can be obtained by integrating equation (1), as shown in equation (2) :

$$\begin{aligned} \Delta\Psi_{m1} &= \int_{t+T}^t (u_{S1} - R_{S1}I_{S1} - L_{S1} \frac{dI_{S1}}{dt} - R_1I_1 - L_1 \frac{dI_1}{dt}) dt \\ &= -R_{S1} \int_t^{t+T} I_{S1f} dt - L_{S1} [I_{S1f}]_t^{t+T} - R_1 \int_t^{t+T} I_{1f} dt - L_1 [I_{1f}]_t^{t+T} \end{aligned} \quad (2)$$

In one period, LCC1 converter transformer core flux produces DC bias, which leads to sympathetic inrush current. If there is an inter-turn fault in LCC1 converter transformer at this time, the differential current contains the inrush current, whose second harmonic content may be large, resulting in delay or rejection of differential protection.

A measure of paralleling "bypass thyristor pairs" under MMC1 bridge arms is proposed to suppress sympathetic inrush current. It is of great significance to ensure the safety and stability of converter transformer and power grid.