

MMC-HVDC 的新型交流故障穿越策略

王林¹, 郭贤朝², 姚传涛¹, 庄志发¹, 向权舟¹, 戴甲水¹

(1. 中国南方电网超高压输电公司 天生桥局, 贵州 兴义 562400;

2. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

摘要: 通常柔性直流输电(MMC-HVDC)系统在满功率调制下, 开关管的过流裕度较小, 容易在整流站交流故障恢复时刻发生桥臂过流现象。深入分析了柔直系统中的环流特性, 推导出环流幅值和相位关系, 以及环流对桥臂电流中有功和无功分量电流的影响。指出MMC固有的环流可减小桥臂有功电流的峰值, 并基于此提出了在交流故障期间不使能环流抑制的新型交流故障穿越策略。新策略增加了交流故障穿越的成功率, 简单可靠, 易于实现, 最后通过实时数字仿真(RTDS)试验平台验证所提策略的正确性。

关键词: 柔性直流输电; 过流裕度; 环流; 故障穿越

中图分类号: TM761 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed20052

A New AC Fault Ride-through Strategy of MMC-HVDC

WANG Lin¹, GUO Xianchao², YAO Chuantao¹, ZHUANG Zhifa¹, XIANG Quanzhou¹, DAI Jiashui¹

(1. Tianshengqiao Bureau, CSG EHV Power Transmission Company, Xingyi 562400, Guizhou, China;

2. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: Generally the IGBT has a less over-current margin when modular multilevel converter HVDC (MMC-HVDC) is used under full power modulation, bridge arm overflow is easy to occur at the AC fault recovery of the rectifier station. The characteristics of the circulating current in the MMC-HVDC were analyzed deeply, and the relationship between the amplitude and phase of the circulating current was deduced. The influence of the circulating current on the active and reactive component currents in the bridge arm current was also discussed. A new strategy of AC fault crossing without circulating current suppression during AC fault period was proposed, basing on the inherent circulation of MMC which can reduce the peak value of active current. The new strategy not only increases the success rate of AC fault crossing, but also is simple, reliable and easy to implement. Finally, the correctness of the proposed strategy was verified through the real time digital simulator(RTDS) test platform.

Key words: modular multilevel converter HVDC (MMC-HVDC); over-current margin; circulation; fault ride-through

随着国家经济的发展, 各个地区的用电量与日俱增, 不断刷新供电需求, 而这些需求主要集中在沿海和中部地区。通常这些地区的火电、水电和新能源接入都无法满足本地区的供应需求, 往往需要跨区域输送。近年来就建设了多条直流输电工程, 缓解部分地区供电压力。其中柔性直流较常规直流不存在逆变站换相失败的问题, 且具有独立有功和无功功率调节的特点, 使得柔性直流工程越来越得到大家的青睐^[1]。

以两端的MMC-HVDC为例, 通常整流站采用定直流电压控制, 逆变站采用定有功功率控制。在交流系统出现不平衡的情况下, MMC-

HVDC灵活的电流控制和较好暂态特性保证了柔直具有可靠的故障穿越能力^[2-3]。

一般来说, 整流站在交流故障恢复时刻可能发生桥臂过流, 逆变站在交流故障时刻可能发生桥臂过流。逆变站在工程实践中考虑到系统链路延迟, 桥臂过流可能难以避免。本文主要考虑整流站在交流故障恢复时刻的故障穿越特性。文献[4-6]在电网电压不平衡条件下, 从环流抑制控制、子模块电容电压平衡和抑制直流侧功率震荡方面提出了改进控制算法, 保证了柔直的暂态特性。文献[7]考虑送受端能量的平衡和直流电压稳定控制, 在送端发生交流故障期间, 降低受

端输出的能量。文献[8]在孤岛运行方式下,增加电流环限制策略,保证了交流电压的输出。文献[9]在故障穿越期间,优化了无功控制目标、电压阈值和故障期间的有功无功电流限幅值,提高了柔直暂态稳定特性。目前鲜有文献介绍整流站交流故障恢复时刻的控制策略,常规做法主要以降低MMC-HVDC的有功功率输出,保证在故障恢复时刻桥臂不出现过流。

MMC换流器由于投入的电容频繁充放电,电容电压规律性波动,导致换流器各相间固有系统环流。学者通常思想认为环流对于MMC-HVDC是不利的,从本质上分析环流产生的机理^[10-11],加入环流抑制算法来抑制换流器的环流,从而减小因环流导致电抗器和子模块的损耗^[12-13],关于环流如何影响桥臂电流鲜有提及。

本文从环流角度入手,旨在增加桥臂的过流裕度为前提条件,通过推导MMC换流器固有的环流幅值和相位的关系,分析环流对桥臂有功电流和无功电流幅值的影响,得出环流可以减小桥臂有功电流峰值的结论。在此基础上提出了交流故障期间不使能环流抑制功能的新策略,并搭建RTDS数字仿真平台,验证了所提方案的可行性。

1 MMC环流理论分析

1.1 MMC系统结构

图1为三相MMC换流器的拓扑结构图,上下桥臂完全对称,其中L和R为桥臂电抗器和等效电阻,每个SM子模块包含2个开关管和1个电容,通过控制上、下管的开通关断,子模块中的电容可实现投入和退出,结合桥臂电流方向,投入

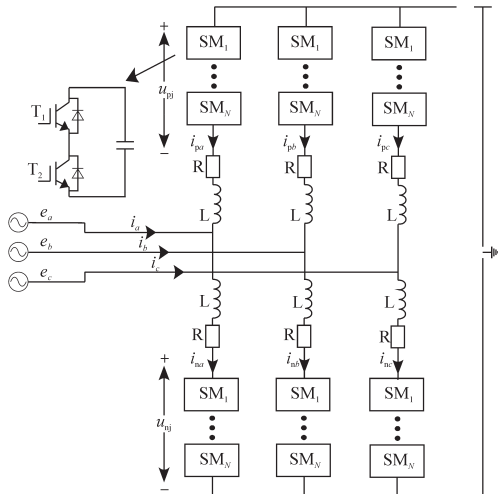


图1 三相MMC的拓扑结构图

Fig.1 Three-phase MMC topology

的电容将被充放电。由于三相电容电压存在差异性,即便控制投入总个数相同情况下,也不能保证三相的直流侧电压的一致性。如果三相电压出现不一致,那么必然会由直流电压较大一相向直流电压较小一相流入电流。上述是从换流器的拓扑结构上分析存在的固有环流,下面将从原理上推导环流的幅值和相位特征。

1.2 MMC环流推导

以a相上桥臂的电压和电流为例:

$$u_{pa}(t) = \frac{1}{2} u_{dc} [1 - k \sin(\omega_0 t)] \quad (1)$$

$$i_{pa} = \frac{1}{3} i_{dc} [1 + m \sin(\omega_0 t + \varphi)] \quad (2)$$

式中: k 为电压输出调制度; m 为电流输出调制度; u_{dc} 为直流极间电压; i_{dc} 为直流电流; ω_0 为基波角频率; φ 为换流器的功率因数角度。

因此,储存在a相上桥臂的能量可表示为

$$w_{pa} = \int u_{pa} i_{pa} dt \quad (3)$$

式(3)的简化式中包含直流和交流分量,直流分量为柔直传输的有功功率,在稳态情况下为定值。后面的讨论中只针对其中的交流分量进行分析,交流分量化简为

$$w_{ACpa} = \frac{u_{dc} i_{dc}}{6\omega_0} [k \cos \omega_0 t - m \cos(\omega_0 t + \varphi) + \frac{mk}{4} \sin(2\omega_0 t + \varphi)] \quad (4)$$

同理a相下桥臂可化简为

$$w_{ACna} = \frac{u_{dc} i_{dc}}{6\omega_0} [-k \cos \omega_0 t + m \cos(\omega_0 t + \varphi) + \frac{mk}{4} \sin(2\omega_0 t + \varphi)] \quad (5)$$

a相交流能量可化简为

$$w_{ACa} = \frac{u_{dc} i_{dc} mk}{12\omega_0} \sin(2\omega_0 t + \varphi) \quad (6)$$

式(6)为a相的交流能量,此能量为换流器的环流积累的能量。在不考虑环流抑制和子模块冗余情况下,只考虑交流成分中的2倍频分量,而直流侧电压应为额定直流电压,可以近似认为 $u_{dc} = u_{dcref}$ 。那么a相环流产生的能量可表示为

$$w_{ACa} = \int u_{dcref} i_{diff}(t) dt \quad (7)$$

式中: i_{diff} 为流过a相桥臂的环流。

联立式(6)和式(7),a相环流可等效为

$$i_{diff} = \frac{i_{dc} mk}{6 \cos \varphi} \cos(2\omega_0 t + \varphi) \quad (8)$$

式(8)推导出桥臂 a 相环流的幅值和相位关系,式中的变量可相应得出一些结论:1)环流表现为2倍频形式;2) i_{dc} 为桥臂电流的交流分量的幅值,若桥臂电流交流分量增大,环流呈现出增大的趋势。3) k 为电压输出调制度,若柔直向系统提供容性无功功率增大,环流呈现出增大的趋势。

1.3 讨论环流对桥臂有功电流和无功电流的影响

式(2)说明桥臂电流包含交流分量和直流分量,直流分量导致桥臂电流正负极峰值不一致。为了探讨环流对桥臂有功电流和无功电流的影响,搭建了RTDS数字仿真平台辅助验证。

图2~图4为RTDS数字仿真平台上输出无环流抑制的有功功率200 MW、容性无功200 Mvar和感性无功200 Mvar的波形,波形由上至下依次为网侧 a 相电流、 a 相上桥臂电流、 a 相环流和直流极线正极电流。

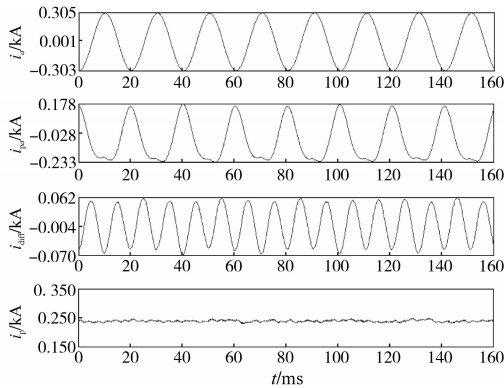


图2 无环流抑制有功200 MW

Fig.2 The active power of 200 MW without circulating suppression

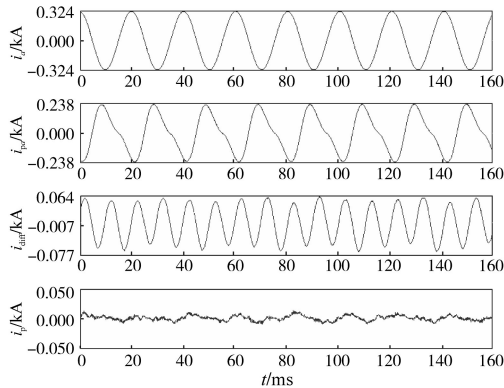


图3 无环流抑制感性无功200 Mvar

Fig.3 The inductive reactive power of 200 Mvar without circulating suppression

图2~图4波形进一步校验环流与交流侧电流的幅值和相位的关系,与式(8)得出的结论是一致的。

有别于图2未投入环流抑制策略,图5为有

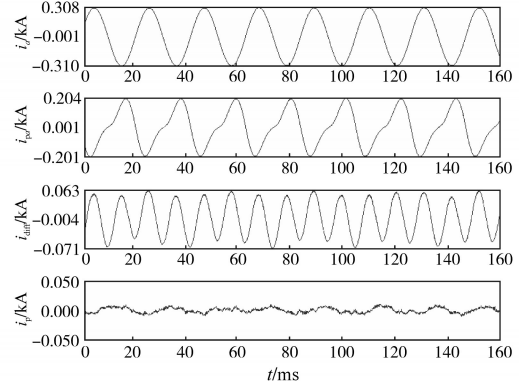


图4 无环流抑制容性无功200 Mvar

Fig.4 The capacitive reactive power of 200 Mvar without circulating suppression

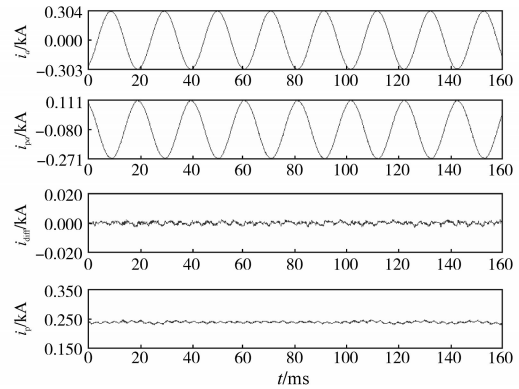


图5 有环流抑制有功200 MW

Fig.5 The active power of 200 MW with circulating suppression

图6为有环流抑制的电流示意图。为了更加形象说明桥臂电流中各电流量幅值和相位的关系,图6中已将桥臂电流的组成量表示出来,其中峰值为1.0(标么值)的是交流分量,峰值为0.4(标么值)的环流分量,0.4(标么值)的直流分量对桥臂电流相位无影响,图中未标记。在无环流抑制条件下,有功分量的桥臂电流交流分量由于叠加了2倍频环流,削减了桥臂电流峰值。而由图3和图4可知,环流不影响桥臂电流中无功电流峰值,即使投退环流抑制策略,对桥臂无功分量电流的峰值也是没有影响的。

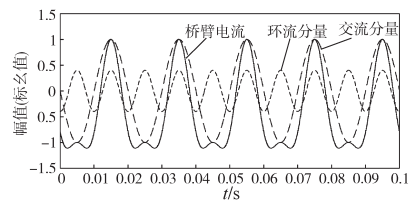


图6 有环流抑制的电流示意图

Fig.6 The current schematic diagram with circulating suppression

根据以往工程经验,IGBT的电流利用率大约为60%,由式(8)可知,随着有功功率增大,直流电流和环流的峰值也将增大。若在某种条件下不采用环流抑制策略,桥臂电流有功分量可被叠加的环流削减峰值。在不损失传输功率条件下,可降低故障期间桥臂电流峰值。本文以两端柔性直流背靠背工程为例,以整流站故障恢复时刻易发生桥臂过流为试验背景,研究整流站在交流故障恢复时故障穿越效果。

2 新型交流故障穿越策略

首先分析柔直系统在交流故障恢复时刻,因剧烈的电压变化率,整流站潮流流入趋势,以及控制器响应延时等影响,可导致桥臂电流出现暂态过冲现象。为了减缓此问题,常规做法是在故障期间限制有功功率的传输,以牺牲功率为代价增加桥臂电流暂态变化裕度。

本文以保证交流故障期间有功功率输出为前提,提出了在交流故障期间不使能环流抑制的新型交流故障穿越策略。新策略不损失故障期间有功功率,降低了桥臂电流峰值,增加了桥臂电流暂态变化裕度,进一步提高了故障穿越的成功率。图7为柔直进入交流故障穿越后控制流程图。

新型交流故障穿越策略:检测网压正序幅值

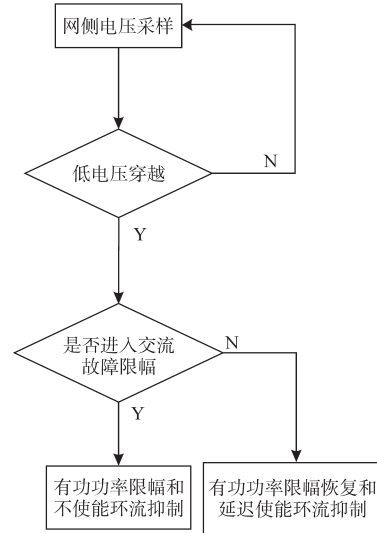


图7 交流故障环流使能的流程图

Fig.7 Flow chart of circulating current enabling for AC fault

小于设定阈值 U_{set} ,启动故障逻辑。若进入交流故障判据后,依据电压跌落幅度等比例限制有功功率,不使能环流抑制。交流故障恢复后,定比例恢复有功功率限幅值,延迟恢复环流抑制控制。柔直在交流故障期间采用正、负序控制策略,正序控制器保证柔直功率传输;负序控制器抑制网侧负序电流。简化的整体控制结构框图如图8所示, U_1 侧换流站采用定直流电压控制模式, U_2 换流站采用定有功功率控制模式。

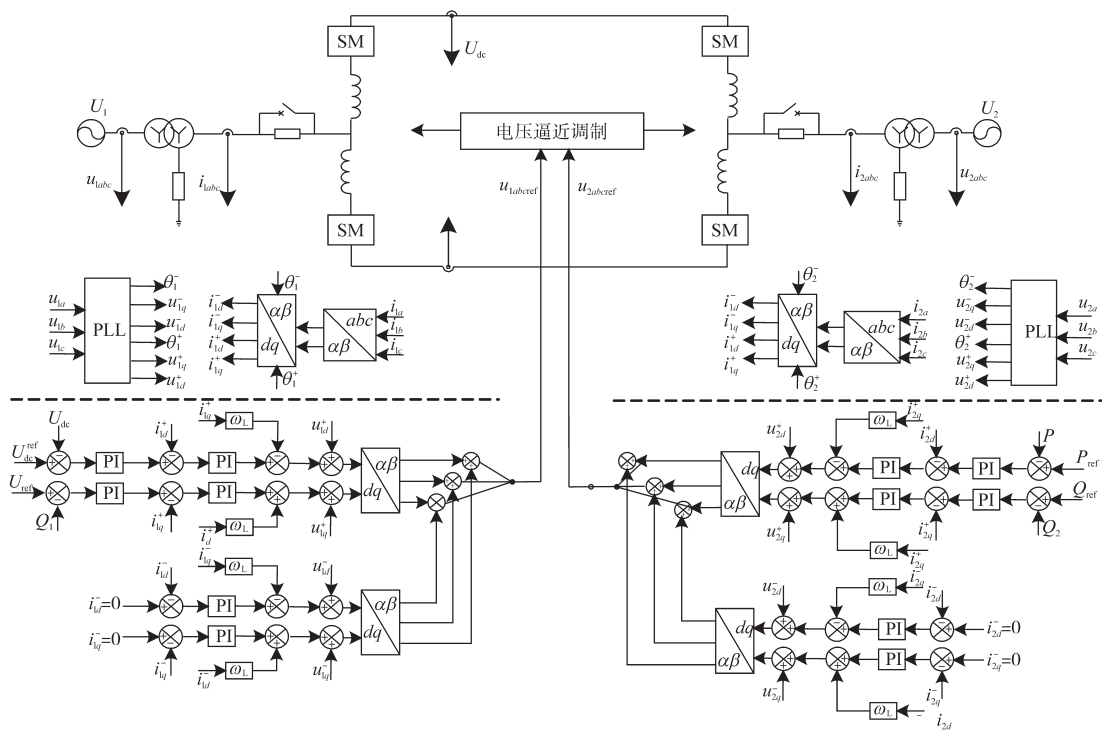


图8 MMC的控制框图

Fig.8 Control block diagram of MMC

3 数字仿真实验验证

为了验证本文所提控制策略的可行性,搭建了两端背靠背MMC-HVDC的RTDS半实物仿真平台,柔直的最大输出功率1 000 MW,每个桥臂均由1 000个子模块组成,系统的控制频率为10 kHz,控制系统的链路延迟时间为400 μ s。

本文1.3节中指出了换流器固有环流对桥臂电流中无功分量大小无影响,为了排除无功功率对试验干扰,下面的试验中柔直只输送有功功率。试验选取MMC-HVDC输出1 000 MW,分别在整流站测试单相金属性接地故障和故障相跌落至50%的高阻接地故障,对比采用传统控制始终投入环流抑制策略和本文所提出新型交流故障穿越策略,为了保证恢复时刻柔直控制量已稳定,故障持续时间设定为1 s。

图9为传统金属性接地故障穿越波形,即始终投入环流抑制策略,标记①为故障相电压恢复前上、下桥臂稳态电流分别为-0.822 kA和0.636 kA。标记②为恢复故障相电压所造成的电流冲击,此时上下桥臂电流冲击分别为-1.114 kA和0.912 kA。

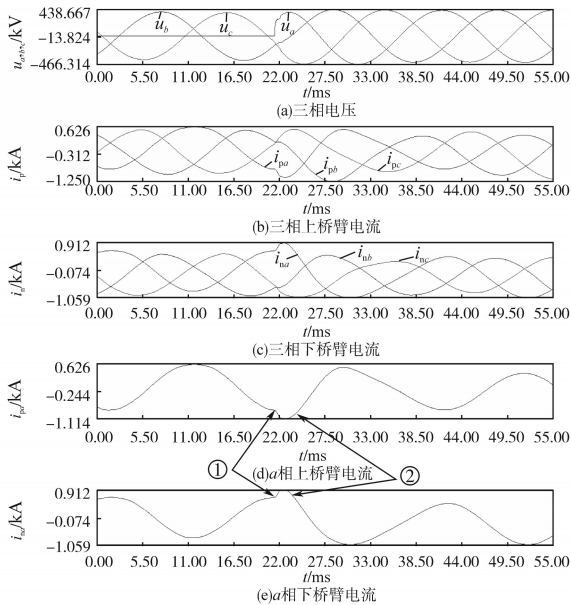


图9 单相金属性接地故障期间始终投入环流抑制
Fig.9 Always put in circulating suppression during single-phase metal grounded

图10为本文所提出在金属性接地故障下的新型交流故障穿越波形,标记③为故障相电压恢复前上、下桥臂稳态电流分别为-0.727 kA和0.726 kA,较标记①的最大桥臂电流小了近100 A,说明柔直的相间环流可以减小了桥臂有功电流,

与第1节理论分析是一致的。标记④为恢复故障相电压所造成的电流冲击,此时上、下桥臂的电流冲击-1.031 kA和1.004 kA,较标记②的最大桥臂电流同样小了近100 A。

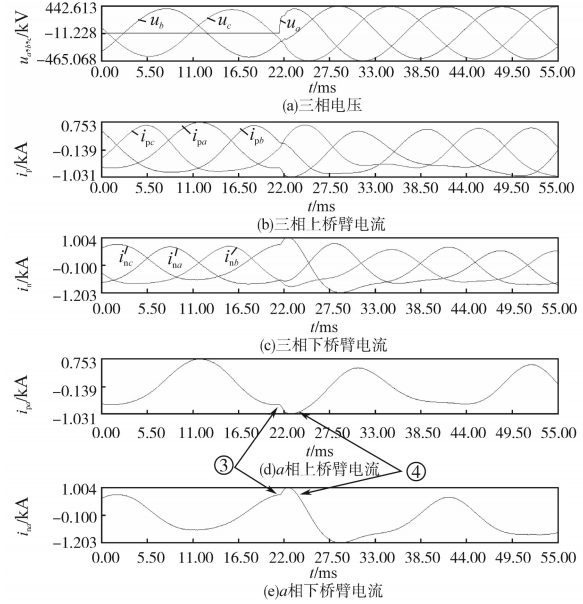


图10 单相金属性接地故障期间不使能环流抑制
Fig.10 Without circulating suppression during AC fault during single-phase metalgrounded

图11为传统高阻接地故障穿越波形,即始终投入环流抑制策略,标记⑤为故障相电压恢复前上下桥臂稳态电流分别为-0.919 kA和0.590 kA。标记⑥为恢复故障相电压所造成的电流冲击,此时上下桥臂的电流冲击分别为-1.850 kA和-1.348 kA。

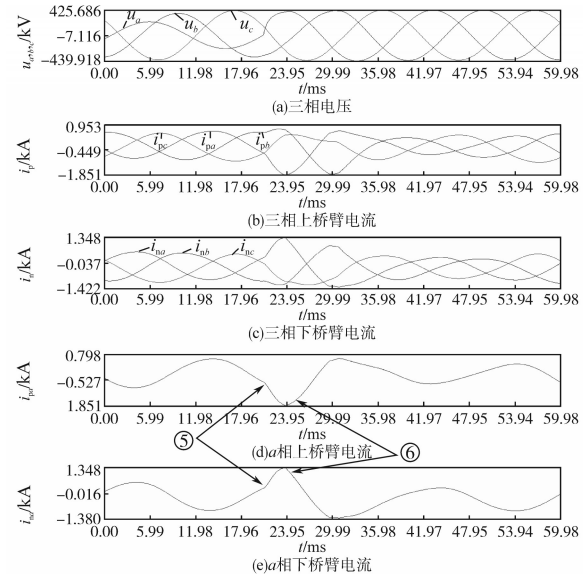


图11 单相高阻接地故障期间始终投入环流抑制
Fig.11 Always put in circulating suppression during single-phase high resistance grounded

图12为本文所提出在高阻接地故障下的新型交流故障穿越波形,标记⑦为故障相电压恢复前上、下桥臂稳态电流分别为 -0.786 kA 和 0.761 kA ,较标记⑤的最大桥臂电流小了 133 A ,与第1节理论分析是一致的。标记⑧为恢复故障相电压所造成的电流冲击,此时上、下桥臂的电流冲击分别为 -1.661 kA 和 1.743 kA ,较标记⑥的最大桥臂电流小了 107 A 。

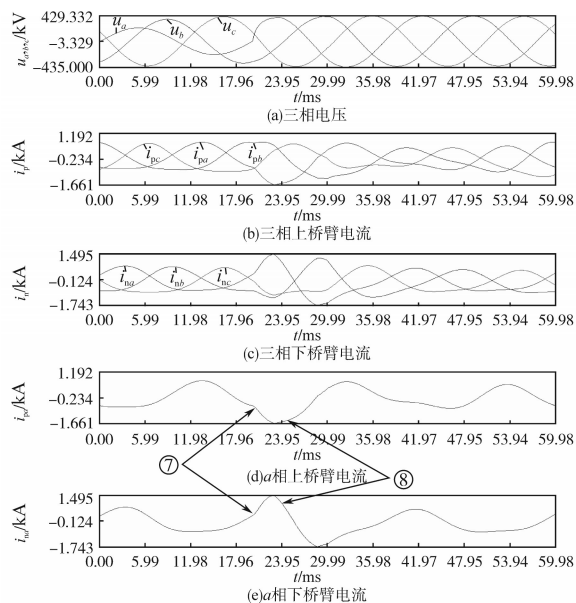


图12 单相高阻接地故障期间不使能环流抑制
Fig.12 Without circulating suppression during AC fault
during single-phase high resistance grounded

通过上述试验数据对比,本文所提交流故障穿越策略确实可减小交流故障恢复时刻桥臂电流冲击,在不损失功率前提下,增加了故障穿越的成功概率。

4 结论

1)本文首先推导了MMC换流器中环流幅值和相位关系,并分析了环流对桥臂有功和无功电流的影响。所提出新型控制策略从降低桥臂电流幅值角度入手,大大提高柔直的穿越能力,整体控制思想简单清晰,易于实现。

2)虽然不使能环流抑制控制将增大子模块

和桥臂电抗器的损耗,但是瞬时的交流故障通常发生在 100 ms 以内,相比于增加的故障穿越的成功率,瞬间的换流器损耗可以忽略,文本未考虑在故障期间注入环流而减小桥臂电流,具体的谐波注入量与子模块的总体损耗有待寻求最优处理。

参考文献

- [1] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2013.
- [2] 王毅,付媛,苏小晴,等. 基于VSC-HVDC联网的风电场故障穿越控制策略研究[J]. 电工技术学报,2013,28(12):150-159.
- [3] Shi X, Wang Z, Liu B, *et al.* Characteristic Investigation and Control of a Modular Multilevel Converter-based HVDC System Under Single-line-to-ground Fault Conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1):408-421.
- [4] 孔明,汤广福,贺之渊,等. 不对称交流电网下MMC-HVDC输电系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报,2013,33(28):41-49.
- [5] Li S, Wang X, Yao Z, *et al.* Circulating Current Suppressing Strategy for MMC-HVDC Based on Nonideal Proportional Resonant Controllers Under Unbalanced Grid Conditions[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2015, 30(1):387-397.
- [6] 董鹏,蔡旭,吕敬. 不对称交流电网下MMC-HVDC系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报,2018,38(16):4646-4657.
- [7] 肖亮,徐政,刘昇,等. 向无源网络供电的MMC-HVDC送端交流故障穿越策略[J]. 电工技术学报,2016,31(15):89-98.
- [8] 王庆,卢宇,胡兆庆,等. 柔性直流输电系统孤岛运行方式下的故障电流抑制方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(7):56-61.
- [9] 于钊,李兆伟,张怡,等. 提高系统暂态性的柔性直流受段故障穿越策略整定[J]. 电力自动化设备,2008,42(22):78-84.
- [10] 屠卿瑞,徐政,郑翔,等. 模块化多电平换流器型直流输电内部环流机理分析[J]. 高电压技术,2010,36(2):547-552.
- [11] Hagiwara M, Maeda R, Akagi H. Control and Analysis of the Modular Multilevel Cascade Converter Based on Double-star Chopper-cells (MMCC-DSCC) [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(6):1649-1658.
- [12] 陈治国,张鹏,付文轩. 模块化多电平变换器电容电压均衡及环流抑制策略[J]. 电气传动,2016,46(4):55-59.
- [13] 丁然,梅军,赵剑锋,等. 基于正交虚拟矢量的单相MMC系统环流抑制方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(8):38-44.

收稿日期:2019-03-19

修改稿日期:2019-11-22