

Improvement Scheme of a Reverse Blocking Modular Multilevel Converter

Zhukui Tan¹, Yutao Xu¹, Xufeng Yuan², Yong Xiao¹, Qiansu Lv¹, Si Li³

¹Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang Guizhou

²Post Doctoral Research Station of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang Guizhou

³Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing

Email: 983024591@qq.com

Received: May 13th, 2018; accepted: May 28th, 2018; published: Jun. 5th, 2018

Abstract

In this paper, an improved scheme for reverse blocking modular multilevel converter is proposed. In this scheme, the RB-MMC topology without adding any auxiliary devices, only needs to change the blocking pulse of the converter to realize the self-clearing of the DC fault current. At the same time, in order to avoid the AC breaker protection action which may appear in the MMC near end metal short circuit fault, the scheme of series modular resistance in converter bridge arm is put forward. Finally, the correctness and effectiveness of the proposed scheme is verified by PSCAD/EMTDC simulation.

Keywords

RB-MMC, DC Fault, Improvement Scheme, Modular Resistance, Fault Clearance

一种逆阻型模块化多电平换流器的改进方案

谈竹奎¹, 徐玉韬¹, 袁旭峰², 肖永¹, 吕黔苏¹, 李思³

¹贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州 贵阳

²贵州电网有限责任公司博士后科研工作站, 贵州 贵阳

³北京四方继保自动化股份有限公司, 北京

Email: 983024591@qq.com

收稿日期: 2018年5月13日; 录用日期: 2018年5月28日; 发布日期: 2018年6月5日

摘要

本文针对一种逆阻型模块化多电平换流器(Reverse Blocking Modular Multilevel Converter, RB-MMC)

文章引用: 谈竹奎, 徐玉韬, 袁旭峰, 肖永, 吕黔苏, 李思. 一种逆阻型模块化多电平换流器的改进方案[J]. 电力与能源进展, 2018, 6(3): 121-130. DOI: 10.12677/aepe.2018.63014

提出了改进方案,在该方案下, RB-MMC拓扑无需增加任何辅助器件,只需要改变换流器的闭锁脉冲即可实现直流故障电流的自清除。同时,为了避免MMC近端金属性短路故障时可能出现的交流断路器保护动作,提出了在换流器桥臂串入模块化电阻的方案。最后,基于PSCAD/EMTDC仿真验证了所提方案的正确性和有效性。

关键词

逆阻型模块化多电平换流器, 直流故障, 改进方案, 模块化电阻, 故障清除

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)技术的诞生,可以称得上是柔性直流输电工程技术发展史上的重要里程碑。与常规的两电平或三电平换流器技术相比,MMC模块化的级联结构,易于达到高电压等级,避免了器件直接串联所带来的静动态均压、开关损耗大、谐波含量高缺陷[1][2]。而基于半桥式子模块(half bridge sub-module, HBSM)的常规MMC拓扑结构是不具有短路故障切除能力的[3][4][5][6][7],在直流线路短路故障发生时必须跳开交流断路器,从而导致整个系统停运。

文献[3]中提出一种自阻型子模块拓扑,文献[8]在此基础上提出采用逆阻型子模块,两者本质相同,因此也都存在子模块脉冲触发不均一导致的过电压问题。文献[9]进一步提出在逆阻型IGBT旁并联吸收回路来降低对模块触发脉冲一致性的要求。但该吸收回路由电容和晶闸管构成,考虑到电容的体积和成本,该方案在实际应用中会受到限制。

本文提出一种逆阻型子模块改进方案,即逆阻型子模块在换流器故障闭锁时,只将子模块上管IGBT关断,下管RB-IGBT保持开通,使电路的状态变为三相交流电源直接短路,避免了续流二极管带来的整流状态,短路点由于承受交流电压自然灭弧,短路电流消失。同时,为了避免极端情况下短路点距离MMC端口非常近,直流故障保护时间可能会超过交流断路器的保护动作时间,提出在MMC桥臂串入模块化电阻来加速故障清除的速度和避免交流侧的过电流。最后在PSCAD/EMTDC仿真平台上建立仿真模型,通过仿真验证了所提方案的正确性和有效性。

2. 改进方案的基本原理

2.1. 改进方案工作原理

二极管续流效应是基HBSM的常规MMC无法清除直流故障的原因。为了避免这种续流效应,文献[8]提出了一种逆阻型子模块拓扑,其结构如图1所示。这种子模块拓扑的特点是下管采用RB-IGBT,可省去两个反并联二极管,同时具有正、反向耐压相同和通态损耗低的特点[8][9][10]。

改进方案下唯一不同之处在于换流器故障闭锁阶段,只将子模块上管IGBT关断,下管RB-IGBT保持开通,具体开关状态和输出电压关系如表1所示。

2.2. 直流故障清除原理

改进方案下直流故障保护后,避免了续流二极管带来的整流状态,故障电路变为三相交流电源通过换流器的连接电抗短路,如图2所示[11]。

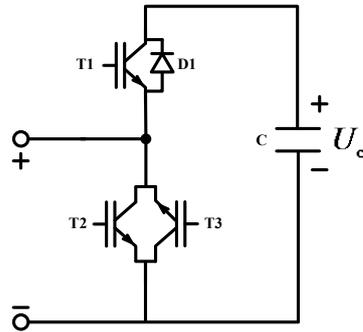


Figure 1. Reverse blocking sub-module topology of MMC
图 1. MMC 逆阻型子模块拓扑

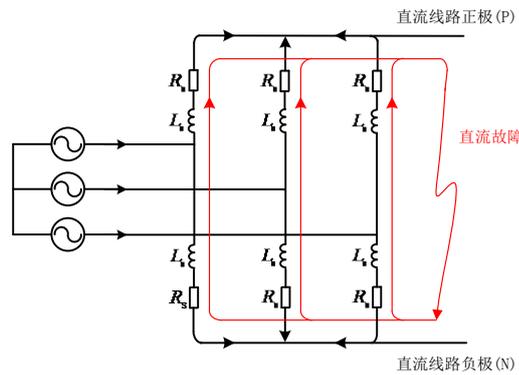


Figure 2. Equivalent circuit of MMC after DC fault protection
图 2. MMC 在直流故障保护作用后的等效电路

Table 1. Relation between switching state and output voltage of the improved scheme (1: on, 0: off)
表 1. 改进方案开关状态和输出电压关系(1: 开通, 0: 关断)

工作状态	T1	T2	T3	输出电压
投入	1	0	1	U_c
切除	0	1	1	0
闭锁	0	1	1	0

直流短路电流 i_{dc} 的动态方程如下:

$$\frac{di_{dc}}{dt} + \frac{\frac{2}{3}R_s + R_d}{\frac{2}{3}L_s + L_d} i_{dc} = 0 \quad (1)$$

其中, L_s 为 MMC 桥臂电抗器, R_s 为桥臂的等效电阻, R_d 和 L_d 表示直流故障电流通路的电阻和电抗。

假设 RB-IGBT 在 t_0 时刻开通, t_0 时刻的直流故障电流为 $i_{dc}(t_0) = I_0$, 则 i_{dc} 可以表示为

$$i_{dc} = I_0 e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} \quad (2)$$

其中时间常数:

$$\tau = \frac{\frac{2}{3}L_s + L_d}{\frac{2}{3}R_s + R_d}$$

从式(2)中可以看出直流故障电流将自然衰减到0。这是由于 RB-IGBT 导通的作用使换流器不再起到一个不控整流桥的作用。实际上, 这种情况下直流短路故障转变为一种交流故障。如果直流短路故障是非永久性的, 直流故障点在电流过零是可以灭弧, 故障点的绝缘可以自动恢复。

由式 2 中时间常数的表达式可以看出, 若在回路中串入模块化电阻, 将减小时间常数, 即可以加快电流衰减进而加快直流故障清除速度。

2.3. 直流短路故障保护策略

基于 MMC 的柔性直流输电的故障保护策略如图 3 所示。在保护策略中, 通过检测直流故障电流来判定 MMC 系统是否发生直流短路故障; 如果发生故障, 换流器快速闭锁, 系统进入故障保护状态; 对于瞬时性故障系统重合闸进行恢复, 对于永久性故障需要跳开交流断路器停电检修。

3. 仿真分析

通过一个 300 MVA/±150 kV 的 MMC-HVDC 系统来验证本文改进方案的可行性, 系统结构如图 4 所示, 仿真参数见表 2。

3.1. 瞬时性短路故障

在 $t = 0.8 \text{ s}$ 时刻, 发生瞬时性直流短路故障, 对应的仿真波形如图 5 所示。当检测到直流线路故障时, 立即进入故障保护状态, 由于 RB-IGBT 的导通, 直流故障电流逐渐衰减为零, 待故障电流自动灭弧后, 系统进行重合闸。

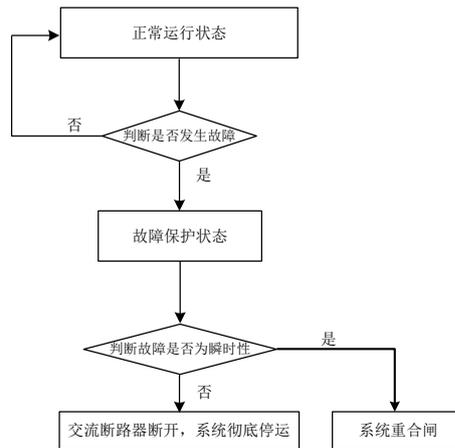


Figure 3. Flow chart of protection method for overhead line fault
图 3. 架空线故障的保护方法流程图

Table 2. Simulation parameters
表 2. 系统仿真参数

参数	有名值
系统额定容量	300 MVA
变压器变比(Y/Δ)	220 kV/150 kV
直流母线电压	±150 kV
桥臂子模块数	4
子模块电容	1000 μF
桥臂电感	100 mH
架空线电阻	0.0917 Ω/km
架空线电感	1.66 mH/km

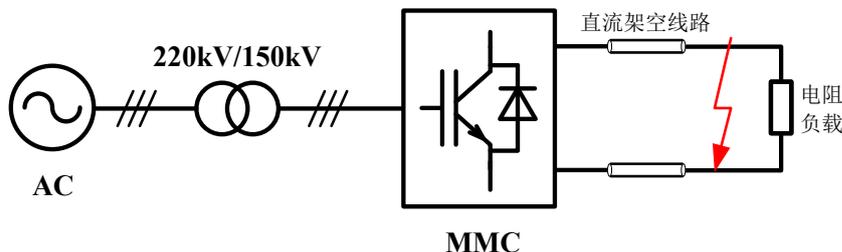


Figure 4. Structure of simulation system
图 4. 仿真系统结构图

3.2. 永久性短路故障

发生永久性故障时，对应的仿真波形如图 6 所示。自动重合闸之前的过程与图 5 相同，但是发生了第二次线路过流，判断系统发生永久性直流短路故障，交流断路器跳开，系统进行停电检修。与图 5 比较，图 6(a)直流电压、图 6(b)直流电流和图 6(c)交流电网电流在永久性故障系统停运后都为零。

3.3. MMC 近端金属性短路故障

式(2)中的时间常数 τ 是部分取决于短路电阻 R_d 的。 R_d 越大所需的直流故障保护时间越小。由于多数故障都并非直接的金属性短路， R_d 都至少是有几欧姆的数值的，因此大多数情况下直流保护所需的时间都会小于交流断路器的动作时间。只有在非常少数的极端情况下，当直流短路故障为金属性短路($R_{sc} = 0$)，并且短路点与 MMC 端口非常近($R_L \approx 0$)， R_d 的数值将非常小，直流故障保护时间才可能会超过交流断路器的保护时间。

针对这种特殊情况，本文提出在 MMC 每个桥臂中串入如图 7 所示的模块化电阻来加快直流故障电流的清除速度。其中每一个模块由一个 RB-IGBT 及与之并联的电阻 R_c 构成。系统正常工作时，RB-IGBT 一直处于导通状态， R_c 将被旁路，从而避免了额外的功率损耗。当直流故障发生时，在进入故障保护状态的同时投入模块化电阻。

理论上讲， R_c 越大，直流故障电流的清除速度越快、交流侧过电流的抑制能力越强。但是 R_c 越大会导致与其并联的 RB-IGBT 承受更高的电压，甚至烧毁。为了避免此种情况的发生，文中采用了模块化电阻的方案。实际应用中模块化电阻的模块数只要能保证直流故障保护时间小于交流断路器的保护时间和交流侧不会发生过电流保护的即可，这样可以降低系统增加的成本。

在系统稳定之后，0.8 s 时，引入永久性直流双极短路故障。交流断路器的保护动作时间被设置为故障后的 100 ms。图 8 为 MMC 近端金属性短路故障时没有投入模块化电阻的仿真波形。从图 8(b)可以看出，直流电流衰减到 0 用了 150 ms，超出了交流断路器的保护动作时间 100 ms，因此改进方案在这种特殊情况下的保护是失败的。图 9 为 MMC 近端金属性短路故障时投入模块化电阻的仿真波形。其中，每个桥臂模块化电阻总阻值 6Ω 。从图 9(b)可以看出，直流电流衰减到 0 用了 61.4 ms，在交流断路器的保护动作时间 100 ms 之内，因此改进方案在这种特殊情况下可成功地对直流故障电流进行清除。图 9(d)为模块化电阻 RB-IGBT 承受的总电压，其峰值约为 13 kV。如果选取 3300 V 的 RB-IGBT 并考虑实际安全裕量，需要的模块数为 8 个，对于 300 MVA， ± 150 kV 的系统而言，其额外成本很低。

4. 结论

本文提出一种逆阻型模块化多电平换流器的改进方案，具有以下特点：

- 1) 通过对换流器闭锁脉冲的调整实现了对直流故障的清除，无需增加额外功率器件，降低了成本；

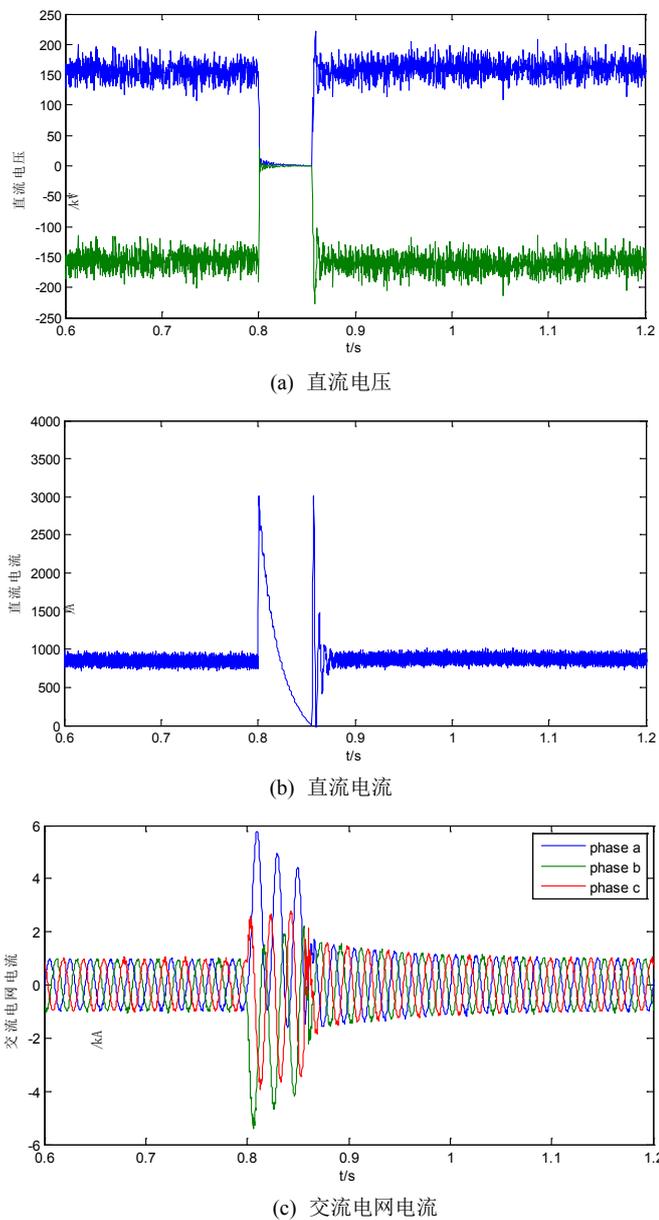
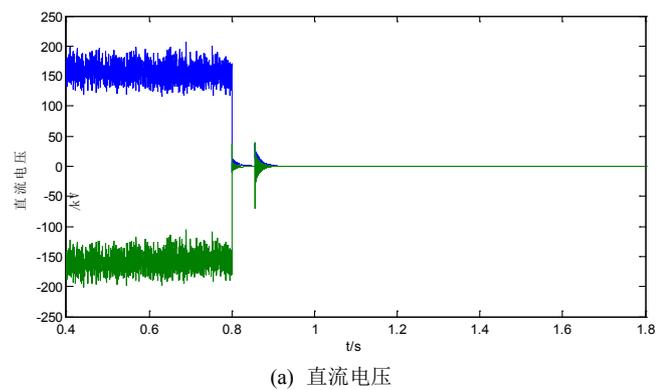


Figure 5. Simulation results of MMC during a nonpermanent dc fault under the proposed protection scheme.

图 5. 直流架空线瞬时性故障时，保护后的仿真波形。



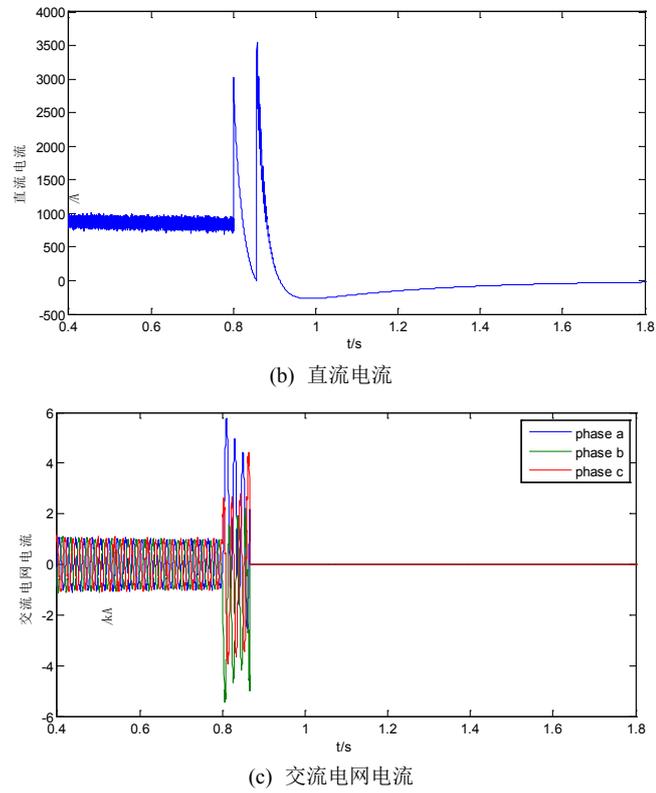


Figure 6. Simulation results of MMC during a permanent dc fault under the proposed protection scheme.
图 6. 直流架空线永久性故障时，保护后的仿真波形。

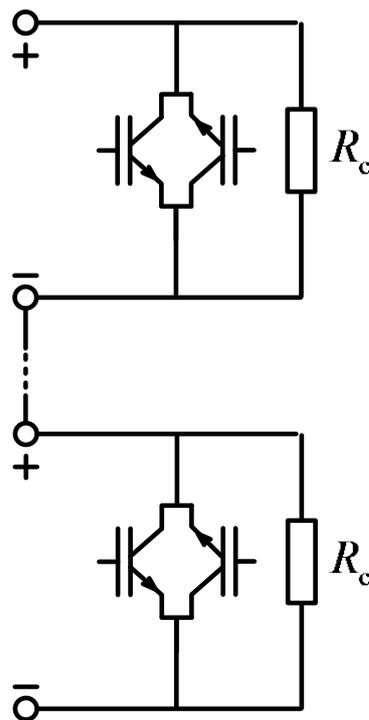
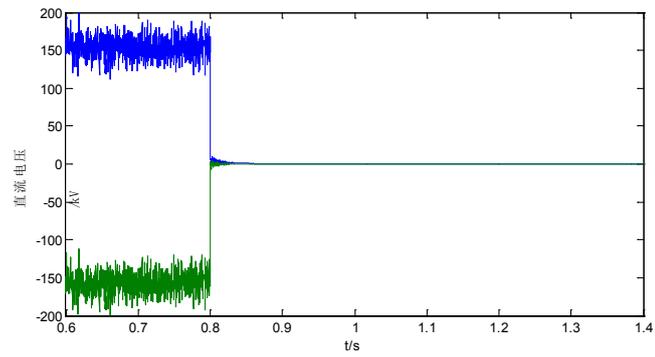
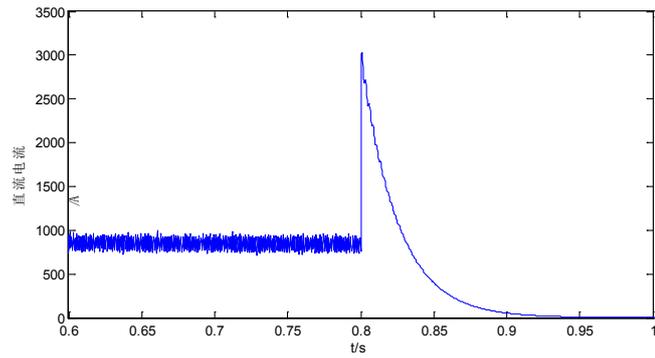


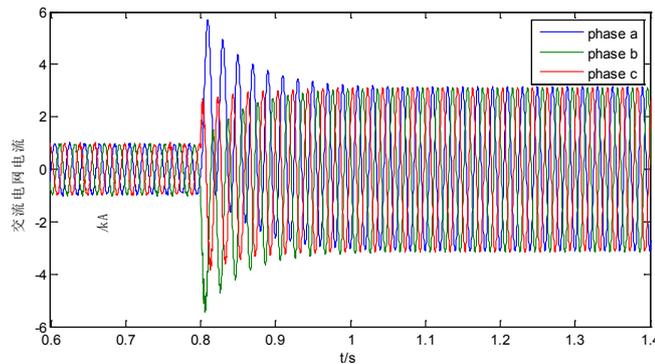
Figure 7. Structure diagram of modular resistance
图 7. 模块化电阻结构图



(a) 直流电压



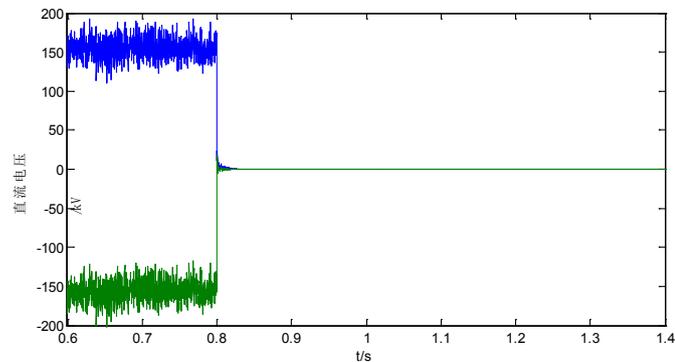
(b) 直流电流



(c) 交流电网电流

Figure 8. The simulation waveform of MMC near end metal short-circuit fault before putting into the modular resistance.

图 8. MMC 近端金属性短路故障时，不投入模块化电阻的仿真波形。



(a) 直流电压

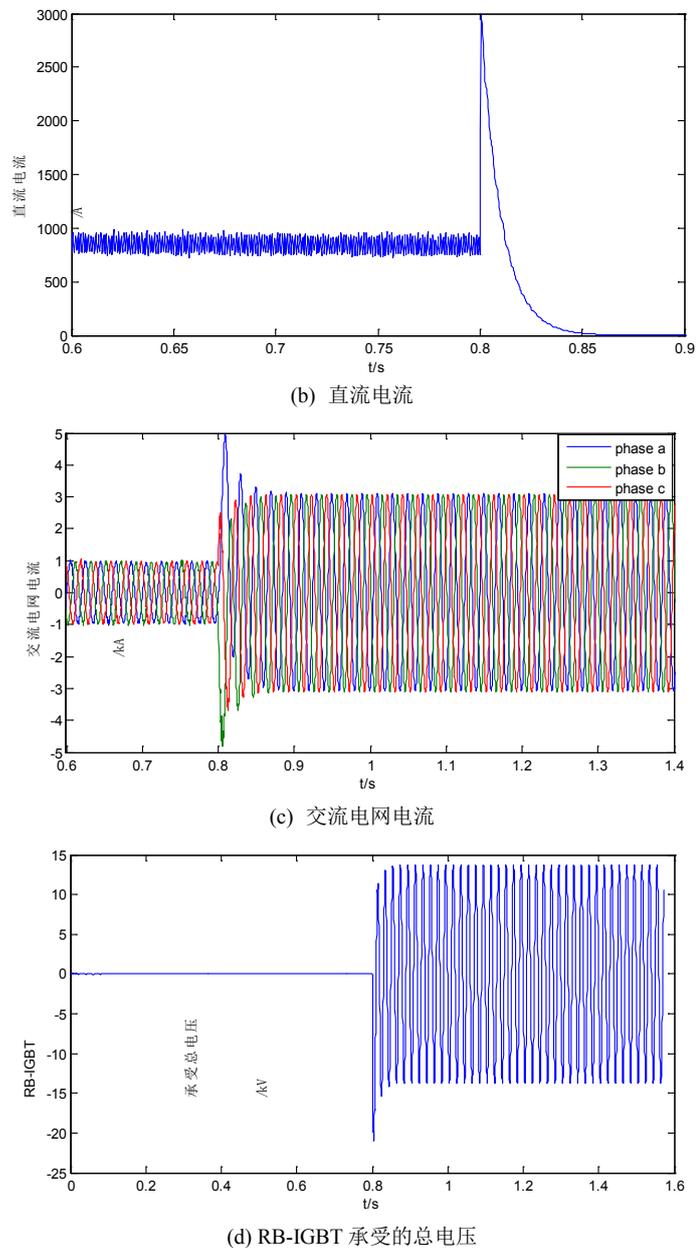


Figure 9. The simulation waveform of MMC near end metal short-circuit fault after putting into the modular resistance.
图 9. MMC 近端金属性短路故障时，投入模块化电阻的仿真波形。

2) 针对 MMC 近端金属性短路故障的特殊情况，可在换流器桥臂串入模块化电阻来加速故障电流清除速度，额外成本低。

本方案适用于所有 MMC 直流短路故障清除应用，其故障清除速度不及自阻型子模块拓扑，但也可满足工程实际需求。考虑自阻型拓扑器件数量较多造成成本的显著增加，本方案适用于对经济性要求较高的应用需求。

基金项目

国家自然科学基金(51667007); 中国南方电网有限责任公司重点科技项目(GZKJQQ00000417)。

参考文献

- [1] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.
- [2] 李笑倩, 刘文华, 宋强, 等. 一种具备直流清除能力的 MMC 换流器改进拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(36): 6389-6397.
- [3] 向往, 林卫星, 文劲宇, 等. 一种能够阻断直流故障电流的新型子模块拓扑及混合型模块化多电平换流器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5171-5179.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] International Electrotechnical Commission. High-Voltage Direct Current (HVDC) Transmission Using Voltage Sourced Converters (VSC). IEC Tech. Rep. TR-62543, Feb. 2011.
- [8] 杨晓峰, 薛尧, 郑琼林, 等. 采用逆阻型子模块的新型模块化多电平换流器[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1885-1891.
- [9] 杨晓峰, 薛尧, 陈博伟, 等. 具有直流故障阻断能力的逆阻型模块化多电平换流器[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 1258-1264.
- [10] Igarashi, S., Miyashita, S., Wakimoto, H., *et al.* (2011) Advanced Three-Level Converter with Newly Developed 1200 V Reverse Blocking IGBTs. *14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, Birmingham, 30 August-1 September 2011, 1-7.
- [11] Li, X.Q., Song, Q., Liu, W.H., *et al.* (2013) Protection of Nonpermanent Faults on DC Overhead Lines in MMC-Based HVDC Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **28**, 483-490. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2226249>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2328-0514, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: aepe@hanspub.org