

DOI:10.13234/j.issn.2095-2805.2018.1.1

中图分类号:TM76

文献标志码:A

基于改进型单极全桥子模块的新型 MMC

薛 尧, 杨晓峰, 陈博伟, 林智钦, 郑琼林
(北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘要:提出了一种改进型的单极全桥子模块结构 MUFBSM(modified unipolar full bridge sub module),其本质是在单极全桥子模块结构 UFBSM(unipolar full bridge sub module)的二极管支路添加一个串联电阻。系统正常工作时,MUFBSM 不会增加额外的损耗;当系统检测到直流侧故障并闭锁后,MUFBSM 中的串联电阻接入故障电流通路,增强了故障回路的阻尼效果并消耗部分系统储存能量,加快了故障电流清除速度,降低了子模块电容电压上升幅值。然后分析了 UFBSM 和 MUFBSM 混合型模块化多电平变换器的故障机理,分析了串联电阻的取值依据。Matlab/Simulink 仿真结果验证了 MUFBSM 的可行性和有效性。

关键词:模块化多电平换流器;改进型单极全桥子模块;直流侧故障穿越;串联电阻

New MMC Based on Modified Unipolar Full-bridge Sub-module

XUE Yao, YANG Xiaofeng, CHEN Bowei, LIN Zhiqin, ZHENG Trillion Q
(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In this paper, a modified unipolar full-bridge sub-module(MUFBSM) is proposed by adding a series resistance to the diode branch of unipolar full-bridge sub-module(UFBSM). When the system is in a normal operation state, MUFBSM will not generate extra power loss; when a DC fault is detected and MUFBSMs are thus blocked, the series resistance will be connected to the fault current path and provide a higher damping effect on the fault current loop, which dissipates part of the initial energy storage of the system. Therefore, the fault current will fall into zero immediately, and the amplitude of capacitor voltage rising in the sub-module is limited. The fault mechanisms of a hybrid modular multi-level converter(HMMC) with UFBSMs and MUFBSMs are analyzed, together with the evaluation on the values of series resistance. Simulation results in Matlab/Simulink validate the feasibility and effectiveness of MUFBSM.

Keywords: modular multilevel converter(MMC); modified unipolar full-bridge sub-module; DC fault ride-through; series resistance

基于电压源换流器的直流输电 VSC-HVDC(voltage source converter based high voltage direct current)作为新一代的直流输电技术,在大规模电力传输、新能源发电并网等领域具有广泛应用前景^[1-3]。VSC 是直流输电技术的核心部分,模块化多电平换流器 MMC(modular multilevel converter)具有高度模块化、

等效开关频率高和输出谐波特性好等优势,是直流输电技术换流器的首选方案^[47]。

基于半桥子模块 HBSM(half bridge sub-module)的典型 MMC 结构不具备直流侧故障穿越能力。目前实际工程中处理直流侧短路故障,多采用交流断路器切断交、直流网络连接的方法^[8-9]。然而该方法响应时间较长,造成故障电流过大,对系统器件要求较高,提高了系统造价。德国学者 Marqurat 于 2010 年和 2011 年相继提出全桥子模块 FBSM(full bridge sub-module)结构和箝位双子模块 CDSM(cl-

收稿日期:2016-05-10;修回日期:2017-03-20

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(E16JB00080)

Project Supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities(E16JB00080)

amping double sub-module)结构^[10-11]。文献[12-15]在对 FBSM 结构进行简化的基础上,研究单极全桥子模块结构 UFBSM(unipolar full-bridge sub-module)。与典型的 HB-MMC 相比,FB-MMC、CD-MMC 及 UFBSM 都具有直流侧故障穿越能力,但都增加了额外的元器件,增大了子模块体积和造价。

针对具备直流侧故障穿越能力的新型子模块使用元器件数量多的问题,文献[14]提出了由 HB-SM 和新型子模块混合级联,得到子模块混合型模块化多电平换流器 HMMC(hybrid MMC)的方案,由此获得最佳的经济效益。

本文分析了 UFBSM 的故障机理,在此基础上提出了改进型的单极全桥子模块 MUFBSM(modified unipolar full-bridge sub-module)结构。相比 UFBSM 结构,MUFPSM 结构在二极管支路添加了一个串联电阻,其具有以下特性:①正常工作状态下,串联电阻没有电流通过,子模块不产生额外的损耗;②闭锁状态下,串联电阻接入故障电流通路,加快了故障电流清除速度,降低了子模块电容电压上升幅值。Matlab/Simulink 的仿真结果验证了 MUFBSM 的有效性。

1 单极全桥子模块

1.1 单极全桥子模块结构

如图 1 所示,UFBSM 是在 FBSM 的基础上去掉 1 个 IGBT(T_3)构成的,其中 U_{SM} 为子模块端口电压, i_{SM} 为子模块端口电流, U_c 为子模块电容电压,方向如图中所示。UFBSM 在正常工作状态下, T_4 持续导通, D_3 承受反向电压保持关断, T_1 、 T_2 交替导通使子模块输出 0 和 U_c 两种电平。

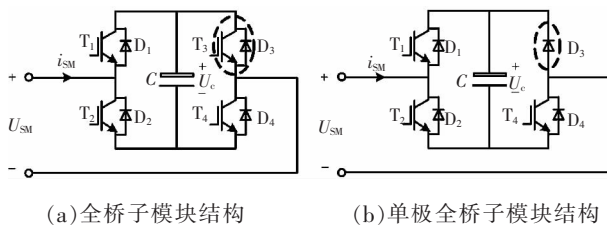


图 1 FBSM 与 UFBSM 拓扑结构

Fig.1 Topologies of FBSM and UFBSM

当发生故障时,UFBSM 关闭所有的 IGBT,进入闭锁状态。此时 UFBSM 在故障电流回路中提供反电势,具备故障电流的双向阻断能力,其闭锁状态下电流通路如图 2 所示。UFBSM 的工作状态如表 1 所示。

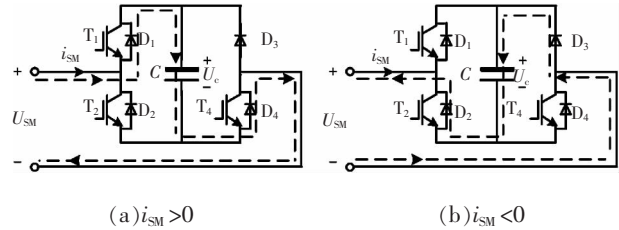


图 2 UFBSM 闭锁状态电流通路

Fig.2 Current paths of UFBSM in a blocking state

表 1 UFBSM 开关状态

Tab.1 Switching states of UFBSM

状态	i_{SM}	T_1	T_2	T_4	U_{SM}	C
正常	>0	1	0	1	U_c	充电
	<0	1	0	1	U_c	放电
	>0	0	1	1	0	旁路
闭锁	<0	0	1	1	0	旁路
	>0	0	0	0	U_c	充电
	<0	0	0	0	$-U_c$	充电

与 FBSM 相比,UFBSM 节省了 1 个 IGBT(T_3),在投资成本和子模块体积上有优势;但 UFBSM 正常工作时不能输出 $-U_c$ 电平,因此 UFBSM 仅适用于 AC/DC 或 DC/AC 场合。

1.2 单极全桥子模块混合型 MMC

尽管 UFBSM 能够穿越直流故障,但仍存在不足之处:与 HB-MMC 相比,UFBSM 额外增加了较多的元器件,增加了运行损耗和投资成本。针对这一问题,提出了基于 HBSM 和 UFBSM 的混合型 MMC 拓扑结构,如图 3 所示,称为 UFBSM-HMMC。

UFBSM-HMMC 的单个桥臂包括桥臂电感 L 、 n 个 HBSM 和 m 个 UFBSM,在保证系统直流故障穿越能力的前提下,减少了器件数量并降低了运行损耗。其中 n 和 m 的数量满足以下原则:①单个桥臂内所有子模块投入所产生的桥臂电势大于等于网侧线电压;②闭锁后,所有子模块在相间回路内提

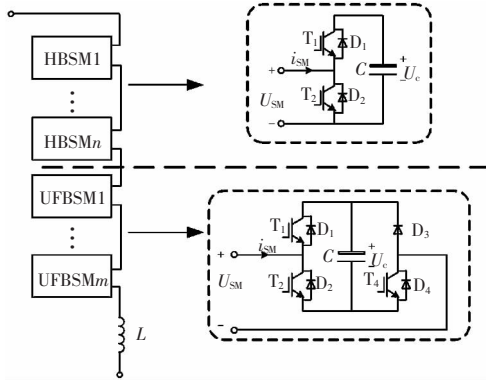


图 3 UFB-HMMC 桥臂结构

Fig.3 Arm topology of UFB-HMMC

供的反电势大于网侧线电压。分别表示为

$$\begin{cases} n+m=N \\ NU_c \geq U_L \\ 2mU_c > U_L \end{cases} \quad (1)$$

式中: N 为单个桥臂子模块总数; U_L 为系统网侧线电压。

综上所述, UFB-HMMC 的每个桥臂选取 $N/2$ 个 UFBSM 即可以保证阻断直流故障。

对 UFB-HMMC 的故障机理进行分析前设定以下时间节点: T_0 时刻, 发生直流侧双极短路故障, 在此之前系统正常运行; T_1 时刻, MMC 系统进入闭锁状态; T_2 时刻, 故障清除, 故障电流降为 0。

$T_0 \sim T_1$ 时段: 系统发生直流侧双极短路故障, 故障电流存在 2 个通路: 直流电容放电通路和交流侧馈能通路。其故障等效电路如图 4 所示, 其中 R_{fault} 为直流侧故障等效电阻, i_{sc} 为桥臂故障电流。

$T_1 \sim T_2$ 时段: 系统检测到直流侧故障, 封锁所有 IGBT 的触发信号, 进入闭锁状态。此时, HBSM 旁

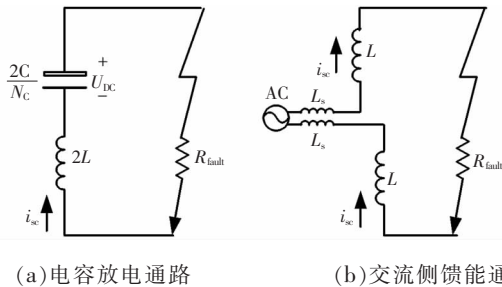


图 4 $T_0 \sim T_1$ 时段 UFB-HMMC 故障等效电路

Fig.4 Fault equivalent circuit of UFB-HMMC in the time interval of $T_0 \sim T_1$

路, UFBSM 在故障回路中提供反电势, 由于该时段内相间回路的反电势大于网侧线电压, 因此交流馈能的影响十分有限, 可以忽略。因此该时段内故障电流通路的等效电路如图 5 所示, 其中二极管 D 为单个桥臂的等效二极管。

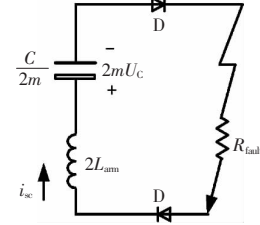


图 5 $T_1 \sim T_2$ 时段 UFB-HMMC 故障等效电路

Fig.5 Fault equivalent circuit of UFB-HMMC in the time interval of $T_1 \sim T_2$

图 5 中, 桥臂故障电流对 UFBSM 电容充电, 电流降为 0 后, 受二极管影响电容不会放电。该阶段桥臂故障电流为

$$i_{\text{sc}}(t) = e^{-\frac{t}{\tau}} \left[I_1 \cos(\omega t) - \frac{I_1 R_{\text{fault}} + 4mU_c}{4\omega L} \sin(\omega t) \right] \quad (2)$$

式中: $\tau = \frac{4L}{R_{\text{fault}}}$; $\omega = \sqrt{\frac{m}{LC} - \frac{R_{\text{fault}}^2}{16L^2}}$; I_1 为 T_1 时刻的单相桥臂故障电流。

由式(2)可以看出, 故障等效电阻 R_{fault} 增大时, 桥臂故障电流 i_{sc} 的时间常数 τ 减小, 故障电流的衰减速度加快。

2 改进型单极全桥子模块

2.1 改进型单极全桥子模块结构

本文提出了一种改进型单极全桥子模块 MUFBSM(modified unipolar full bridge sub module)结构, 如图 6 所示, 其电流通路如图 7 所示。

正常工况下, MUFBSM 与 UFBSM 的工作模式一致, 即 T_4 持续导通, 通过控制 T_1 、 T_2 交替导通使子模块在桥臂中投入或切除。如图 7(a)、(b)所示, 在正常工况时, MUFBSM 的 D_3 承受反向电压保持关断, 单个串联电阻 R_5 没有电流通过, 因此不会产生额外损耗。

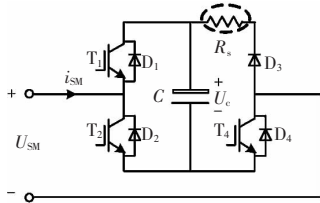
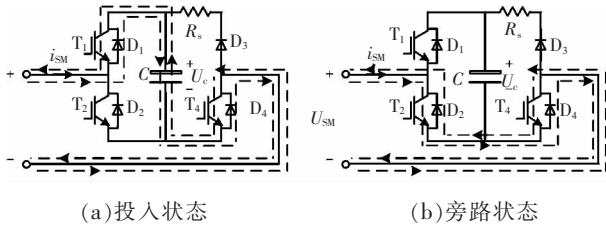


图 6 MUFBSM 拓扑结构

Fig.6 Topology of MUFBSM



(a)投入状态

(b)旁路状态

(c)直流侧故障闭锁状态

图 7 MUFBSM 电流通路

Fig.7 Current paths of MUFBSM

如图 7(c)所示,当系统发生直流侧故障并进入闭锁状态后,故障电流通过二极管支路向子模块电容充电,MUFBSM 的串联电阻 R_s 接入故障电流回路中。

2.2 改进型单极全桥子模块结构

本文提出的基于改进型单极全桥子模块的混合型模块化多电平换流器 MUFBSM-HMMC (hybrid MMC based on modified unipolar full bridge sub module) 结构如图 8 所示,每个桥臂由 n 个 HBSM、 m

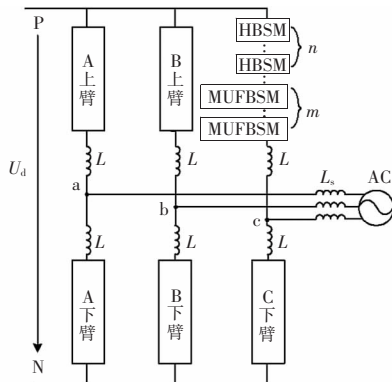


图 8 MUFBSM-HMMC 拓扑结构

Fig.8 Topology of MUFBSM-HMMC

个 MUFBSM 和桥臂电感 L 组成, n 与 m 同样需满足式(1)的关系。

在各项元件参数相同的前提下,正常工作时 MUFBSM 与 UFBSM 的工作特性相同,因此当 MUFBSM-HMMC 发生直流侧故障但并未进入闭锁状态时,其故障特性与 UFB-HMMC 一致,如第 1 节中 $T_0 \sim T_1$ 时段所描述。当系统进入闭锁状态后,MUFBSM 的串联电阻 R_s 接入故障电流回路,此时系统的单相故障等效电路如图 9 所示。

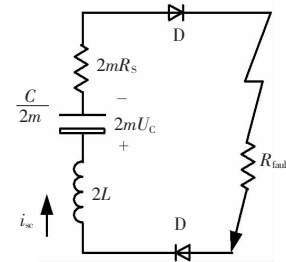


图 9 MUFBSM-HMMC 闭锁后故障等效电路

Fig.9 Fault equivalent circuit of MUFBSM-HMMC in blocking state

MUFBSM-HMMC 闭锁期间,桥臂故障电流为

$$i_{sc}(t) = e^{-\frac{t}{\tau}} \left[I_1 \cos(\omega't) - \frac{I_1 R_{eq} + 4mU_C}{4\omega'L} \sin(\omega't) \right] \quad (3)$$

$$\text{式中: } \tau = \frac{4L}{R_{eq}}; \omega' = \sqrt{\frac{m}{LC} - \frac{R_{eq}^2}{16L^2}}; R_{eq} = 2mR_s + R_{fault}。$$

单个串联电阻 R_s 的功率、消耗能量 E_R 和 T_4 管承受的最大反向电压 U_{T4_max} 表示为

$$P_R(t) = i_{sc}^2(t) R_s \quad (4)$$

$$E_R(t) = \int_{t_1}^{t_2} P_R(t) dt \quad (5)$$

$$U_{T4_max} = U_C(t_1) + I_1 R_s \quad (6)$$

根据能量守恒定律,子模块电容电压 U_C 的变化关系为

$$mC[U_C(t_2)^2 - U_C(t_1)^2] = L I_1^2 - 2mE_R \quad (7)$$

MUFBSM 故障闭锁后, R_s 接入故障电流通路,增强了故障通路的阻尼效果,使故障电流迅速下降为 0;在系统闭锁期间,串联电阻 R_s 会消耗部分系统储存能量,降低 MUFBSM 电容电压的上升幅值。

R_s 的选取应当参考以下因素:① T_4 管耐压要求; R_s 取值增大时, T_4 管承受的最大反向电压 U_{T4_max}

会升高;②耗散能量要求:若耗散能量过大,电阻发热严重,会影响子模块散热,若耗散能量太小,子模块电容电压上升幅值较大;③故障电流清除速度要求: R_s 影响故障电流清除速度。

3 仿真验证

为验证 MUFBSM 的技术可行性,在 Matlab/Simulink 环境下搭建了 UFBSM 和 MUFBSM 子模块混合型 MMC 的 3 相 9 电平模型。部分仿真参数如下:直流侧电压为 7.5 kV;子模块电容为 5 600 μ F;桥臂电感为 20 mH;故障等效电阻为 1 m Ω 。设定仿真时间在 0.40 s 时发生直流侧双极短路故障,在 0.401 s 时系统检测到故障并进入闭锁状态。

当 MUFBSM 的串联电阻 R_s 取不同值 0、1、2、5、8、10 Ω 时,故障清除时间 t_c 、子模块电容电压上

升幅值 ΔU_c 、串联电阻消耗能量 E_R 、 T_4 管承受的最大电压 U_{T4_max} 的对比如图 10 所示。

一定范围内, R_s 增大,闭锁后的系统阻尼特性增强,故障清除速度加快;串联电阻消耗能量增加,子模块电容电压上升幅值减小;但 R_s 增大,同时会造成 T_4 管承受最大电压上升,提高了对 T_4 管的耐压要求。

在本文仿真条件下,综合考虑 R_s 对故障清除时间 t_c 、子模块电容电压上升幅值 ΔU_c 、串联电阻消耗能量 E_R 、 T_4 管承受的最大电压 U_{T4_max} 的影响,选取 MUFBSM 串联电阻 R_s 为 5 Ω 。

图 11 和图 12 分别为 R_s 取 5 Ω 时,MUFBSM 与 UFB-HMMC 的直流侧电流和子模块电容电压对比波形。由图可以看出,相比 UFB-HMMC,MUFBSM 的故障清除时间 t_c 下降了约 60%,子模块电容电压上升幅值 ΔU_c 下降了约 75%。

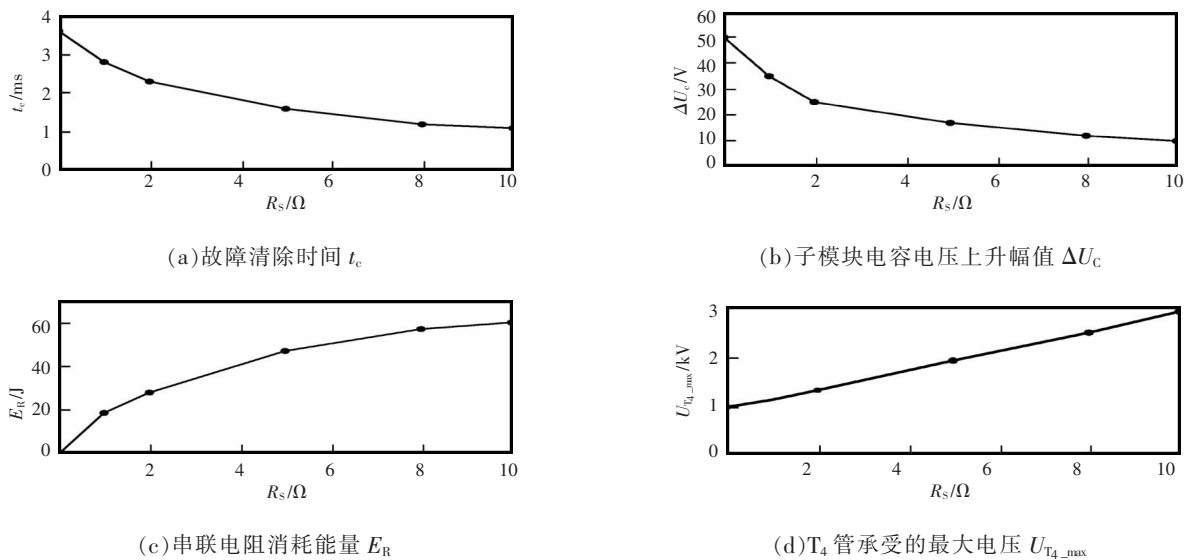


图 10 R_s 取值分析

Fig.10 Evaluation on values of R_s

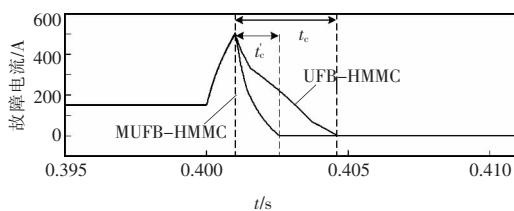


图 11 直流侧电流

Fig.11 Current on DC bus

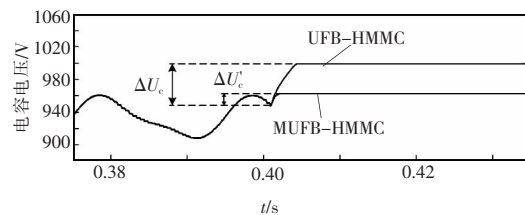


图 12 子模块电容电压

Fig.12 Capacitor voltage of sub-module

4 结论

本文分析了单极全桥子模块及其子模块混合型 MMC 的故障机理,在此基础上提出了一种改进型单极全桥子模块结构。通过理论分析和仿真验证得到以下结论:

(1)系统正常工作时,改进型单极全桥子模块不增加额外的损耗;

(2)系统发生直流侧故障并闭锁后,串联电阻接入故障电流通路,能够大幅减小故障清除时间,降低子模块电容电压上升幅值;

(3)串联电阻的取值会影响系统的故障清除时间、子模块电容电压上升幅值、串联电阻消耗能量、T₄管承受的最大反向电压值,因此其取值范围受上述因素制约。

参考文献:

- [1] 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 (in Chinese).
- [2] Yan L, Wei S, Yong-Ning C, et al. Research on offshore wind farm VSC-HVDC transmission system fault ride through issue[C]. Power System Technology (POWERCON), 2014 International Conference on IEEE, 2014:2190-2195.
- [3] 姚良忠,吴婧,王志冰,等.未来高压直流电网发展形态分析[J].中国电机工程学报,2014,34(34):6007-6020.
Yao Liangzhong, Wu Jing, Wang Zhibing, et al. Pattern analysis of future HVDC grid development[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34):6007-6020 (in Chinese).
- [4] 杨晓峰,林智钦,郑琼林,等.模块组合多电平变换器的研究综述[J].中国电机工程学报,2013,33(6):1-14.
Yang Xiaofeng, Lin Zhiqin, Zheng Qionglin, et al. A review of modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(6):1-14 (in Chinese).
- [5] Alexander A, Thathan M. Modelling and analysis of modular multilevel converter for solar photovoltaic applications to improve power quality[J]. IET Renewable Power Generation, 2014, 9(1):78-88.
- [6] Nami A, Liang J, Dijkhuizen F, et al. Modular multilevel converters for HVDC applications: Review on converter cells and functionalities [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1):18-36.
- [7] 杨晓峰,林智钦,周楚尧,等.模块化多电平换流器 MMC 的环流抑制技术综述[J].电源学报,2015,13(6):58-68.
Yang Xiaofeng, Lin Zhiqin, Zhou Chuyao, et al. Survey of circulating current suppressing technologies in MMC [J]. Journal of Power Supply, 2015, 13(6):58-68 (in Chinese).
- [8] 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(1):1-7.
Wang Shanshan, Zhou Xiaoxin, Tang Guangfu, et al. Analysis of submodule overcurrent caused by DC pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2011(1):1-7 (in Chinese).
- [9] 吴婧,姚良忠,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 Liangzhong, 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 (in Chinese).
- [10] Marquardt R. Modular multilevel converter: an universal concept for HVDC-networks and extended DC-bus-applications[C]. Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International IEEE, 2010:502-507.
- [11] Marquardt R. Modular multilevel converter topologies with DC-short circuit current limitation[C]. IEEE 8th International Conference on Power Electronics, IEEE 2011 ECCE Asia (ICPE & ECCE), 2011:1425-1431.
- [12] 李笑倩,刘文华,杨文博,等.基于半压钳位子模块的 MMC 直流短路故障穿越研究[J].电源学报,2015,13(6):1-8.
Li Xiaoqian, Liu Wenhua, Yang Wenbo, et al. Research on DC-fault ride through of MMC using half-voltage clamp sub-module [J]. Journal of Power Supply, 2015, 13(6):1-8 (in Chinese).

- [13] 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.
Xiang Wang, Lin Weixing, Wen Jingyu, et al. A new topology of sub-modules with DC Fault current blocking capability and a new type of hybrid MMC Converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29), 5171-5179(in Chinese).
- [14] 赵鹏豪, 王朝亮, 许建中, 等. 一种具有直流故障穿越能力的 MMC 子模块拓扑[J]. 电网技术, 2014, 38(12):3441-3446.
Zhao Penghao, Wang Chaoliang, Xu Jianzhong, et al. A sub-module topology of MMC with DC fault ride-through capability[J]. Power System Technology, 2014, 38(12):3441-3446(in Chinese).
- [15] 王一, 刘建政. 用于 MMC-HVDC 直流故障保护的新型拓扑及重合闸控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(8):2312-2319.
Wang Yi, Liu Jianzheng. An enhanced MMC-HVDC topology and system recovery strategy for DC fault protection[J]. Power System Technology, 2015, 39(8):2312-2319(in Chinese).
- [16] Qin J, Saeedifard M, Rockhill A, et al. Hybrid design of

modular multilevel converters for HVDC systems based on various submodule circuits[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1):385-394.



薛尧

作者简介:

薛尧(1991-),男,通信作者,博士研究生,研究方向:多电平换流器控制,E-mail:14121489@bjtu.edu.cn。

杨晓峰(1980-),男,博士,讲师,研究方向:多电平变换器技术,柔性直流输电技术,电能质量控制,E-mail:xfyang@bjtu.edu.cn。

陈博伟(1993-),男,中国电源学会会员,硕士研究生,研究方向:多电平变换器控制,E-mail:15121393@bjtu.edu.cn。

林智钦(1988-),男,博士研究生,研究方向:多电平变换器控制,E-mail:13117362@bjtu.edu.cn。

郑琼林(1964-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向:铁道供电与电力牵引、电能变换与质量控制、高效电力变换器、光伏发电与并网研究,E-mail:tqzheng@bjtu.edu.cn。