采用基频零序分量注入的 MMC 换流器故障容错控制研究

李 爽[1,2]，王志新[1]，吴 杰[1]

（1.上海交通大学电子信息与电气工程学院，上海 200240； 2.上海外高桥造船有限公司，上海 200137）

摘要：针对模块化多电平变流器(Modular multilevel converter，MMC)冗余子模块在故障时存在耗尽的情况，提出了基频零序分量注入的故障容错控制方法。通过与中性点偏移相结合，保证即使出现冗余子模块耗尽，MMC 仍能继续安全运行，解决剩余正常子模块承受应力不均衡问题，保障系统安全、可靠运行。同时，利于减少冗余备份量,并大幅度降低硬件成本和提高运行可靠性。经 Matlab 仿真验证了所提方法的正确性和有效性，为基于 MMC 的海上风电柔性直流输电变流器的可靠运行提供了一种有效的故障控制方案。

关键词：模块化多电平变流器；故障容错运行；零序电压注入；海上风电；VSC-HVDC

Study on fault-tolerant operation control strategy of modular multilevel converters injected with fundamental-frequency zero-sequence voltage component

LI Shuang[1,2], WANG Zhi-xin[1], WU Jie[1]

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Waigaoqiao Shipbuilding Co., Ltd., Shanghai 200137, China)

Abstract: In order to fully implement the functionalities of modular multilevel converter (MMC), its fault-tolerant operation without redundant sub-modules (SMs) is comprehensively investigated. To avoid completely shut down the MMC system under SMs fault, a fundamental-frequency zero-sequence injection based neutral-shift method is adopted to enable the fail-safe energy transfer. This approach enhances both the reliability and availability of MMC while avoiding the undesired unbalanced stresses among the healthy SMs. Rigorous simulation studies are performed to demonstrate the validity and effectiveness of the proposed control methods.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377105) and National High Technology Research and Development program of China (863 Program) (No. 2011AA05A103).

Key words: modular multilevel converter (MMC); fault-tolerant operation; zero-sequence voltage injection; offshore wind power; voltage source converter high-voltage direct-current (VSC-HVDC)

中图分类号： TM76 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2014)17-0001-07

0 引言

当前石化能源紧缺和环境污染等问题，使得可再生能源的开发与利用在世界范围内迅速发展[1]。海上风力发电因其不占用土地、风力资源充沛等优点成为各国学者研究热点[2-3]。随着近海风场规模不断扩大、输电电压等级不断提高，大型海上风电场的输电和并网问题已成为制约海上风电发展的关键因素[4]。基于电压源型的柔性直流输电(Voltage-Source-converter based High-voltage Direct Current Transmission, VSC-HVDC)技术成为连接近海风电场和陆上电网的首选[5-6]。模块化多电平变流器(Modular Multilevel Converter, MMC)相对于传统两电平或三电平变流器，具有运行效率高、输出波形质量好、无需换流变压器就可扩展至高压下运行等特性[7-8]，比较适用于大容量 VSC-HVDC[9-10]。

文献[11]建立了 MMC 的线性时变模型并分析其稳态特性，文献[12]剖析了其动态特性。文献[9]在连续域数学模型的基础上提出了采用内部能量控制器(Inner Energy Controllers)控制 MMC 悬浮电容电压的波动。各子模块(Sub-module, SM)悬浮电容电

基金项目：国家自然科学基金项目(51377105)；国家 863 计划智能电网关键技术重大项目(2011AA05A103)资助

压不平衡，会导致相间环流增大，进而引发输出电流 THD 增高、电力电子开关器件损耗增大、系统运行效率降低等问题，对此，文献[13]理论分析并实验验证了一种悬浮电容电压的平均和平衡控制方法。文献[14]在此基础上引入子模块间最大电压偏差指标，有效避免了同一绝缘栅双极晶体管(Insulated-gate Bipolar Transistor, IGBT)不必要的反复投切，降低了开关次数，减小了 MMC 开关损耗。文献[15]提出一种环流抑制控制器(Circulating Current Suppressing Controller)，在抑制环流的同时可以在较低的开关频率下有效地平衡悬浮电容电压。文献[16]提出一种适用于任意电平 MMC 的脉宽调制方法(Pulsewidth-modulation, PWM)，并分析了该方法下 IGBT 开关损耗特性。

如图 1 所示，MMC 的每个桥臂(arm)都由子模块级联而成。为了保证 MMC 能在一个或者多个子模块发生故障时继续运行，通常每个桥臂中会留有一定数量的冗余子模块。当检测到 MMC 有子模块发生故障被切除时，相应的旁路冗余子模块就会及时地被切入，替代故障子模块继续运行，这也是 MMC 变流器的一个显著特点[6,9]。但是，当极端情况发生时，如，海上风场侧 MMC 的故障子模块数超过预留冗余量、且不允许停机检修时，就需要采用一种更加有效的控制方法来维持系统不间断、安全地运行。

文献[17-19]研究了 H 桥级联型多电平变流器(Cascade H-bridge Multilevel Converter, CHBC)在冗余单元耗尽(无冗余备份)的情况下，系统单元“故障容错”运行的两类控制方法：第一类较直观，找出故障单元数最多的一相，然后在剩余两相切除相同数量的单元(包括正常单元)；第二类仅仅旁路故障单元，系统靠控制算法在剩余正常单元的基础上，继续为负载提供最大幅值的三相平衡线电压。通过对比发现：第一类方法虽然容易实现三相平衡输出，但是系统输出的电压和功率等级降低了，因而该方法需要以牺牲效率和增加每相单元数量为代价，常应用于要求苛刻和不考虑成本的工况；第二类控制策略克服了第一类方法的局限性，常采用如[20]：中性点偏移法、共模电压注入法、参考信号峰值消去法、零序电压注入法等，以保证负载端输出线电压平衡，避免了整个系统停运，增强了设备的可靠性。但以上方法都局限于 CHBC 拓扑结构，鲜有文献讨论 MMC 在冗余子模块耗尽情况下的故障容错运行策略。

为此，本文在 CHBC 已有故障控制策略的基础上，分析研究 MMC 冗余子模块耗尽条件下，换流器系统不间断运行的控制方法，并结合仿真软件 Matlab/Simulink 对所提出的控制策略进行了仿真验证。仿真结果为海上风电柔性直流输电变流器故障保护系统的设计提供了参考。

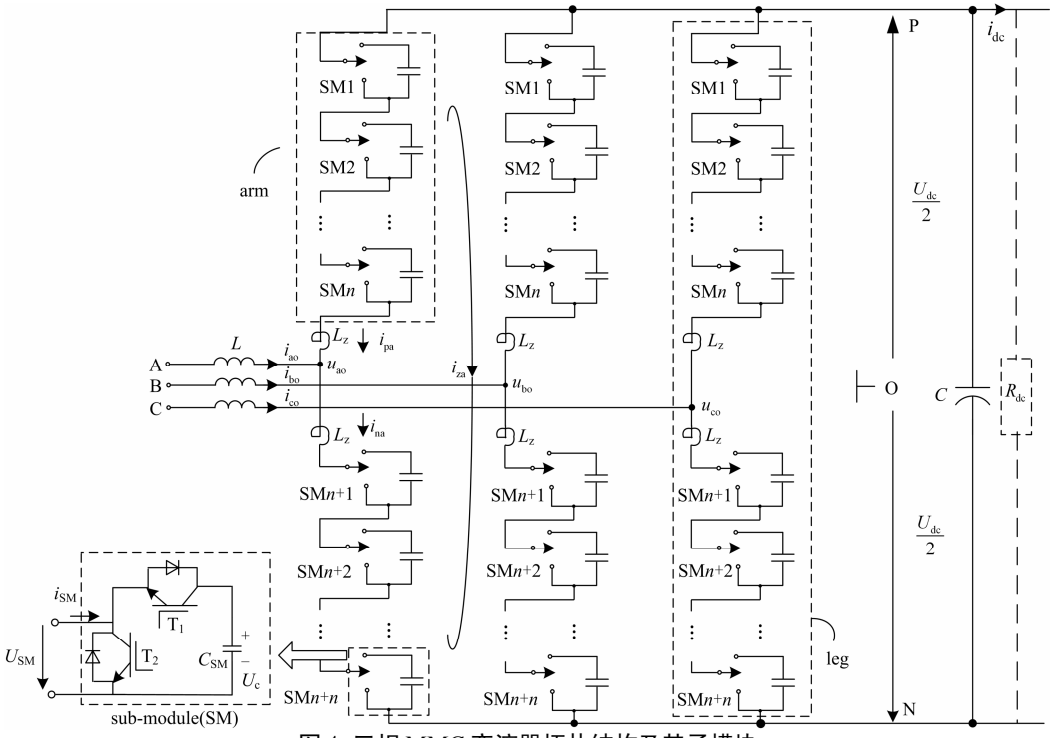


图 1 三相 MMC 变流器拓扑结构及其子模块

Fig. 1 Schematic of a three-phase MMC and the sub-module

1　MMC 的特性及其数学模型

MMC 的概念由学者 Marquardt 和 Lesnicar 于 2003 年首次提出[21]。如图 1 左下侧所示，一个悬浮电容(C_{SM})和两个带反并联二极管的 IGBT(T_1 和 T_2)组成了一个半桥子模块(SM)，而 n 个子模块(SM)和一个缓冲电抗 L_z(主要用于抑制环流并可在输出短路时抑制快速上升的故障电流)组成一个桥臂(arm)。三相 MMC 由六个完全相同的桥臂构成。L 为输入电抗，一般取系统基准阻抗的 15%。由于其模块化的线性结构，MMC 可以输出高达 401 电平的准正弦波[22]，无需换流变压器就可以直接与高压电网相连，其滤波器的设计也变得相对简单。

正常运行时，子模块中的两个开关管(T_1,T_2)只有一个处于导通状态，如：当 T_1 导通时 T_2 关断，输出电压 U_{SM} 等于悬浮电容电压 U_c，此时子模块投入运行；反之，U_{SM} 为 0，子模块被切除[23]。P、N 分别是直流母线的正、负极，O 为直流母线的假想中点。MMC 每相最大输出 n+1 电平，线电压最大电平数为 2n+1，其等效开关频率为每个子模块开关频率 f_s 的 2n 倍[24]。

由基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's voltage law, KVL)，可得电压方程为

$$U_{\mathrm{dc}}=\sum_{j=1}^{2n}u_{jk}+L_z\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(i_{\mathrm{p}k}+i_{\mathrm{n}k})\quad(k=\mathrm{a,b,c}) \tag{1}$$

式中：直流母线电压 U_{dc}=n·U_c；u_{jk} 为第 k 相桥臂第 j 个子模块输出的端口电压值；i_{pk} 和 i_{nk} 分别为第 k 相上(positive)、下(negative)桥臂电流。

每相桥臂内存在的环流 i_{zk} 可表示为[25]

$$\begin{cases}i_{\mathrm{p}k}=i_{\mathrm{ko}}/2+i_{zk}\\ i_{\mathrm{n}k}=-i_{\mathrm{ko}}/2+i_{zk}\end{cases}\Rightarrow i_{zk}=\frac{1}{2}(i_{\mathrm{p}k}+i_{\mathrm{n}k})\quad(k=\mathrm{a,b,c}) \tag{2}$$

式中，i_{ko} 为 MMC 输出电流。

类似地，上、下桥臂电压可表示为

$$\begin{cases}u_{\mathrm{p}k}=U_{\mathrm{dc}}/2-u_{\mathrm{ko}}\\ u_{\mathrm{n}k}=U_{\mathrm{dc}}/2+u_{\mathrm{ko}}\end{cases}\quad(k=\mathrm{a,b,c}) \tag{3}$$

式中，u_{ko} 为 MMC 三相输出端相对假想中点 O 的电压。

2　MMC 故障运行控制策略

MMC 子模块可能会受到电气或环境等因素的影响而发生故障，如：IGBT、悬浮电容故障等。发生故障的子模块会被双向晶闸管或旁路接触器短接，同时，冗余子模块被投入以替代故障子模块继续运行，此时系统输出的电压/功率等级不会发生改变[26]。但是当冗余子模块耗尽时，如，海上风电场侧 MMC 的冗余子模块在下一个停机检修日期到来之前已经全部耗尽且继续有子模块故障切除，为了保持系统继续安全运行，此时需要一种故障容错控制策略。

对此，本文将一个三相 5 电平(n=4)无冗余子模块的 MMC 作为问题分析、研究的对象(实际工程应用中采用 MMC 拓扑结构的电平数很高 n>7，西门子投运的世界首台商业 MMC 的电平数是 401[27-28]。)其正常运行时输出电压矢量如图 2(a)所示，此时 MMC 的中性点 O 和负载中点 M 相重合。假设其 A 相上桥臂有一个模块发生故障被切除、且剩余正常子模块中悬浮电容电压已被平衡[29-33]，为了保证该相上、下桥臂内输出电压的正负对称，故下桥臂也相应地切除一个正常子模块。此时 A 相最大输出 4 电平(n_A=3)，其余两相输出电平数不变，如图 2(b)中所示。由于稳态时 U_{dc}=n·U_c，故当 A 相切除两个子模块后(上、下桥臂各一个)，为保持母线电压在剩余正常子模块中均分并维持输出相电压不变，A 相剩余子模块的调制比应提升 n/(n−2)倍[17]：

$$u_{\mathrm{ao}}=m\frac{U_{\mathrm{dc}}}{2}\sin\omega t=\frac{n}{n-2}m\cdot(n-2)\frac{U_{\mathrm{c}}}{2}\sin\omega t \tag{4}$$

但是，这将导致 A 相剩余正常子模块储存的能量相对于其他两相负担过重，并造成相间环流增大，会进一步加速 A 相剩余子模块的损坏。

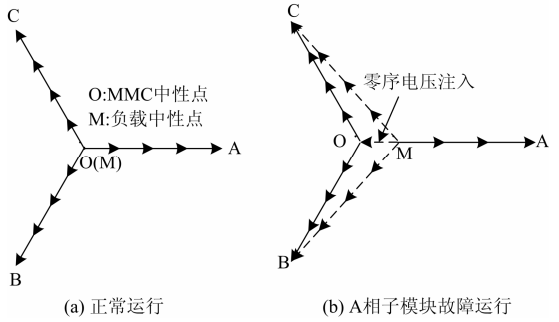


图 2 三相子模块电压矢量图

Fig. 2 Phasor diagram of SMs voltage

对此，Maharjan 等人提出采用零序电压注入的方法，解决了基于 CHBC 拓扑结构的电池簇储能系统的能量平衡问题[17]。Betz 研究了在基于 CHBC 结构的 STATCOM 系统中注入零序分量，以控制各个单元电容电压平衡的方法[20]。本文在以上文献的基础上，有机地将传统中性点偏移和零序电压注入的方法相融合，提出如下一种简单的故障容错控制方法：通过零序电压分量注入，使得 MMC 的中性点

O 偏离负载中点 M，如图 2(b)所示；在中点由 M 向 O 移动的过程中，其余两相单个子模块电压幅值也发生了改变，如：电压矢量 BM、CM 变为 BO、CO；同时维持顶点 A、B、C 不发生位移，从而保证了零序电压注入的过程中 MMC 输出线电压仍保持三相平衡；最后，将 MMC 剩余的正常 6n−2 子模块的悬浮电容储能均衡。具体步骤如下。

设注入的基频零序电压分量为

$$u_{\mathrm{of}} = U_{\mathrm{fm}} \sin(\omega t + \pi) \tag{5}$$

式中：U_{fm} 为基频零序分量的峰值；由相位差 π 可见 u_{of} 与 A 相电压相位反向，见图 2(b)中 MO。

故各桥臂注入该零序电压分量后，式(3)可重写为

$$\begin{cases} u_{\mathrm{p}i} = u_{\mathrm{dc}}/2 - (u_{i\mathrm{o}} - u_{\mathrm{of}}) \\ u_{\mathrm{n}i} = u_{\mathrm{dc}}/2 + (u_{i\mathrm{o}} - u_{\mathrm{of}}) \end{cases} \quad i=\mathrm{a,b,c} \tag{6}$$

由式(2)和式(6)积分可得到桥臂储能为

$$w_i = \int_0^{2\pi/\omega} u_{\mathrm{p}i} i_{\mathrm{p}i} \mathrm{d}t = \int_0^{2\pi/\omega} u_{\mathrm{n}i} i_{\mathrm{n}i} \mathrm{d}t \quad i=\mathrm{a,b,c} \tag{7}$$

为了使剩余正常子模块内的电容存储均衡分布，通过式(5)~式(7)计算可得到注入零序分量的幅值为

$$U_{\mathrm{fm}} = \frac{2}{(n-2)\cdot n} \cdot m \cdot U_{\mathrm{dc}} \tag{8}$$

由此，因故障相引起的不均衡储能在三相间得到了平衡，避免相间环流增大的同时保证了三相输出线电压的平衡。因此，该方法可以使得 MMC 在无冗余备份的子模块故障下，继续在额定电压/功率下安全工作，有效避免了停机隐患。

3　仿真结果及分析

为了验证本文所采用控制方法的有效性和可行性，在仿真软件 Matlab/Simulink 中搭建基于 MMC 的柔性直流输电系统。考虑到 MMC 级联子模块的数量过多会对仿真速度造成影响，故采用每个桥臂四个子模块级联，每个子模块悬浮电容为 1 900 μF，预充至 1 kV。仿真模拟 MMC 无冗余备份子模块的情况，其正常运行时输出 9 电平(2n+1=9，n=4)线电压。其他主要仿真参数如下：系统额定容量 500 kVA，交流侧线电压有效值为 2.3 kV，输入换流电抗器 L 为 5.1 mH，各个桥臂中环流抑制电抗为 3.2 mH，子模块开关频率为 1.35 kHz。仿真结果在系统额定容量和交流侧线电压的基础上标幺化。

MMC 系统正常运行时，每相输出电压相对于中性点 O 为五电平 PWM 波，如图 3(a)所示。图 3(b)为 MMC 交流侧线电压 PWM 波形，稳态时输出规则的 9 电平波形。

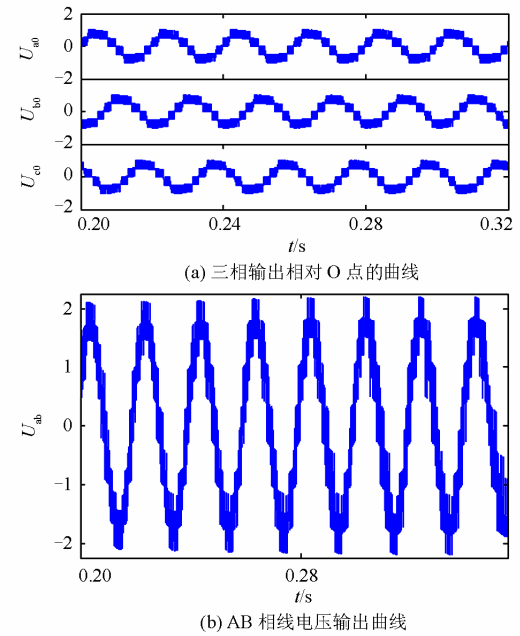


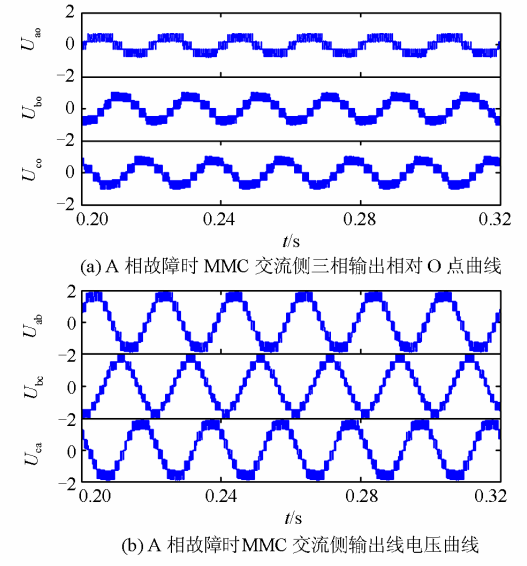
图 3 MMC 无故障时的输出 PWM 波形

Fig. 3 MMC output waveforms during normal operation

假设 A 相上桥臂子模块 SM_1 发生故障被切除，对应的下桥臂正常子模块 SM_8 也被切除，图 4 为该故障运行条件下，MMC 交流侧几种不同输出电压波形：当 A 相子模块发生故障被旁路后，剩余 6 个子模块最大输出四电平 PWM 波 u_{ao}，而其余两相维持五电平 PWM 波 u_{bo}、u_{co} 输出，如图 4(a)所示；图 4(b)为 MMC 交流侧三相线电压波形。由于 A 相发生子模块故障，输出线电压 u_{ab} 和 u_{ca} 的电平数降低，而 u_{bc} 因 B、C 相无故障旁路子模块，故保持原有 9 电平 PWM 输出。通过对比图 3 和图 4 可以发现，在故障运行情况下，尽管输出相电压的基波分量不平衡，其幅值有所变化，但是三相输出线电压是平衡的。可在同等容量下，有效地降低冗余备份子模块的数量，降低了 MMC 的成本。

图 5 为 A 相子模块发生故障被旁路时的暂态波形。MMC 网侧电压、电流如图 5(a)所示。出现故障时，由于 MMC 内部环流和各子模块中悬浮电容能量不均衡，导致输出电流短暂地不平衡波动，采用文中提出的故障容错控制方法，三相电流很快(约 70 ms)恢复平衡。由于 A 相有两个子模块被旁路，被旁路的两个子模块悬浮电容电压逐渐放电至 0 V，正常子模块电容电压的波动随着存储能量的重新分配有所增大。图 5(a)虚线框局部放大图见图 5(b)，

其中，A 相上桥臂(SM_2~SM_4)和下桥臂(SM_5~SM_7)的正常子模块悬浮电容电压由均压策略控制[13]，分别在桥臂内维持电压均衡。

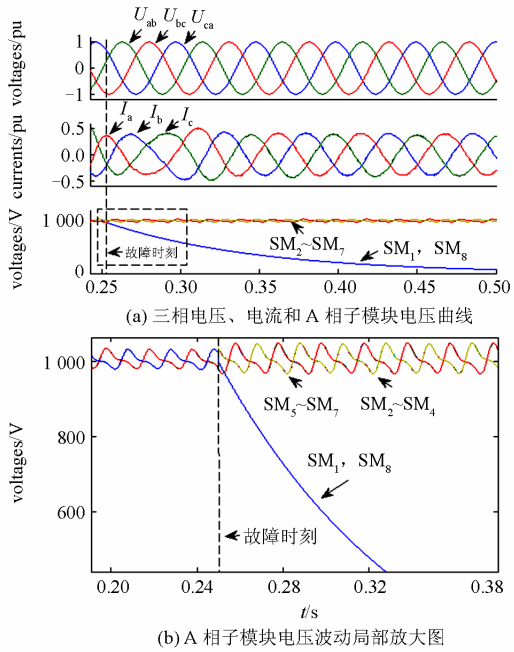


(a) A 相故障时 MMC 交流侧三相输出相对 O 点曲线

(b) A 相故障时MMC 交流侧输出线电压曲线

图 4　A 相故障时 MMC 交流侧响应曲线

Fig. 4 AC side voltage waveforms of the MMC during fault-tolerant operation



(a) 三相电压、电流和 A 相子模块电压曲线

(b) A 相子模块电压波动局部放大图

图 5 MMC 子模块故障时暂态响应曲线

Fig. 5 Transient waveforms when bypass the SM_1 and SM_8 of phase leg-A

4　结论

针对模块化多电平变流器存在冗余子模块耗尽的情况，提出了一种故障容错控制方法，可保证 MMC 型换流器安全不间断运行。该方法将传统 H 桥级联多电平变流器故障时中性点偏移与基频零序分量注入的方法相结合，确保 MMC 交流侧输出三相平衡线电压，并可降低系统冗余备份子模块数量，提高了换流器设备的运行效率和稳定性。仿真结果证明了所提控制方法的正确性和有效性，为海上风电场柔性直流输电 MMC 型换流器提供了一种可行的故障运行控制方案。

参考文献

[1] 薛英林, 徐政. 基于箝位双子模块的 MMC-HVDC 起动控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 1-7.
XUE Ying-lin, XU Zheng. Start control for the MMC-HVDC system based on clamp double submodule [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 1-7.

[2] WANG Zhi-xin, JIANG Chuan-wen, AI Qian, et al. The key technology of offshore wind farm and its new development in China[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(1): 205-211.

[3] 杨晓峰, 王晓鹏, 范文宝, 等. 模块组合多电平变换器的环流模型[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 21-27.
YANG Xiao-feng, WANG Xiao-peng, FAN Wen-bao, et al. Circulating current model of modular multilevel converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 21-27.

[4] 王国强, 王志新, 李爽. 模块化多电平变流器的直接功率控制仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(6): 64-71.
WANG Guo-qiang, WANG Zhi-xin, LI Shuang. Simulation research on direct power control of modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(6): 64-71.

[5] 卓谷颖, 江道灼, 连霄壤. 模块化多电平换流器不平衡环流抑制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 118-124.
ZHUO Gu-ying, JIANG Dao-zhuo, LIAN Xiao-rang. Study of unbalanced circular current suppressing for modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 118-124.

[6] 李响, 韩民晓. 海上风电串联多端 VSC-HVDC 协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 42-57.

LI Xiang, HAN Min-xiao. A coordinated control strategy of series multi-terminal VSC-HVDC for offshore wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 42-57.

[7] 翟晓萌, 赵成勇, 李路遥, 等. 模块化多电平动态电压恢复器的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 86-91.
ZHAI Xiao-meng, ZHAO Cheng-yong, LI Lu-yao, et al. Study of modular multilevel dynamic voltage restorer [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 86-91.

[8] 管敏渊, 徐政. 向无源网络供电的 MMC 型直流输电系统建模与控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 255-263.
GUAN Min-yuan, XU Zheng. Modeling and control of modular multilevel converter based VSC-HVDC system connected to passive networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 255-263.

[9] ANTONOPOULOS A, ANGQUIST L, NEE H P. On dynamics and voltage control of the modular multilevel converter[C] // European Conference on Power Electronics and Applications, Spain, Barcelona, Sep 8-10, 2009: 3353-3362.

[10] 管敏渊, 徐政. MMC 型 VSC-HVDC 系统电容电压的优化平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(12): 9-14.
GUAN Min-yuan, XU Zheng. Optimized capacitor voltage balancing control for modular multilevel converter based VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(12): 9-14.

[11] RASIC A, KREBS U, LEU H, et al. Optimization of the modular multilevel converters performance using the second harmonic of the module current[C] // European Conference on Power Electronics and Applications, Spain, Barcelona, Sep 8-10, 2009: 3998-4007.

[12] TEEUWSEN S P. Simplified dynamic model of a voltage-sourced converter with modular multilevel converter design[C] // IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, Seattle, WA, Mar 15-18, 2009: 996-1001.

[13] HAGIWARA M, AKAGI H. Control and experiment of pulsewidth-modulated modular multilevel converters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 24(7): 1737-1746.

[14] 屠卿瑞, 徐政, 郑翔, 等. 一种优化的模块化多电平换流器电压均衡控制方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 15-20.
TU Qing-rui, XU Zheng, ZHENG Xiang, et al. An optimized voltage balancing method for modular multilevel converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 15-20.

[15] TU Qing-rui, XU Zheng, XU Lie. Reduced switching-frequency modulation and circulating current suppression for modular multilevel converters[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(3): 2009-2017.

[16] ROHNER S, BERNET S, HILLER M, et al. Modulation, losses, and semiconductor requirements of modular multilevel converters[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2010, 57(8): 2633-2642.

[17] MAHARJAN L, YAMAGISHI T, AKAGI H, et al. Fault-tolerant operation of a battery-energy-storage system based on a multilevel cascade PWM converter with star configuration[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2010, 25(9): 2386-2396.

[18] CARNIELUTTI F, PINHEIRO H, RECH C. Generalized carrier-based modulation strategy for cascaded multilevel converters operating under fault conditions[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 679-689.

[19] LEZANA P, ORTIZ G. Extended operation of cascade multicell converters under fault condition[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2009, 56(7): 2697-2703.

[20] BETZ R E, SUMMERS T, FURNEY T. Symmetry compensation using a H-Bridge multilevel STATCOM with zero sequence injection[C] // IEEE Industry Applications Conference, Tampa, FL, Oct 8-12, 2006: 1724-1731.

[21] LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range[C] // IEEE Power Tech Conference Proceedings, Italy, Bologna, 2003, 3: 3762-3768.

[22] PERALTA J, SAAD H, DENNETIERE S, et al. Detailed and averaged models for a 401-level MMC HVDC

system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2012, 27(3): 1501-1508.

[23] POU J, ZARAGOZA J, CEBALLOS S, et al. A carrier-based PWM strategy with zero-sequence voltage injection for a three-level neutral-point-clamped converter[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2012, 27(3): 642-651.

[24] SON G T, LEE H J, NAM T S, et al. Design and control of a modular multilevel HVDC converter with redundant power modules for noninterruptible energy transfer[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2012, 27(3): 1611-1619.

[25] TU Qing-rui, XU Zheng, HUANG Hong-yang, et al. Parameter design principle of the arm inductor in modular multilevel converter based HVDC[C] // International Conference on Power System Technology, China, Hangzhou, Oct 24-28, 2010: 1-6.

[26] GEMMELL B, DORN J, RETZMANN D, et al. Prospects of multilevel VSC technologies for power transmission[C] // IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition, Chicago, IL, Apr 21-24, 2008: 582-597.

[27] GEMMELL B, DORN J, RETZMANN D, et al. Prospects of multilevel VSC technologies for power transmission[C] // Proc IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008: 1-16.

[28] PERALTA J, SAAD H, DENNETIERE S, et al. Detailed and averaged models for a 401-level MMC-HVDC system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2012, 27(3): 1501-1508.

[29] 王志新, 吴杰, 徐烈, 等. 大型海上风电场并网 VSC-HVDC 变流器关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 14-26.
WANG Zhi-xin, WU Jie, XU Lie, et al. The key technology of large offshore wind farms VSC-HVDC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 14 -26.

[30] 黄川, 王志新, 王国强. 基于 MMC 的海上风电场柔性直流输电变流器仿真[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(11): 23-27.
HUANG Chuan, WANG Zhi-xin, WANG Guo-qiang. Simulation of MMC-based converter for flexible direct current transmission of offshore wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11): 23-27.

[31] 王国强, 王志新, 张华强, 等. 基于 DPC 的海上风场 VSC-HVDC 变流器控制策略[J].电力自动化设备, 2011, 31(7): 115-119.
WANG Guo-qiang, WANG Zhi-xin, ZHANG Hua-qiang, et al. DPC-based control strategy of VSC-HVDC converter for offshore wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 115-119.

[32] 邓旭, 王东举, 沈扬, 等. 舟山多端柔性直流输电工程换流站内部暂态过电压[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 111-118.
DENG Xu, WANG Dong-ju, SHEN Yang, et al. Research on transient overvoltage for converter station of Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC project[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 111-118.

[33] 杨晓峰, 郑琼林. 基于 MMC 环流模型的通用环流抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(18): 59-65.
YANG Xiao-feng, ZHENG T Q. A novel universal circulating current suppressing strategy based on the MMC circulating current model[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(18): 59-65.

收稿日期：2013-12-01；　修回日期：2014-02-26

作者简介：

李　爽（1982-），男，博士，研究方向为柔性直流输电变流器及船舶智能微网；E-mail: cooleels@126.com

王志新（1964-），男，教授，博士生导师，研究方向为海上风力发电、光伏发电、电机系统节能；

吴　杰（1980-），女，博士研究生，研究方向为柔性直流输电变流器。