

MMC-HVDC系统谐波研究

模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 由于具有高度模块化、结构紧凑、输出波形质量高和有公共直流母线等优点, 一经提出就备受关注, 被认为是未来高压电能变换领域最具发展潜力的多电平换流器。然而, 由于MMC的结构特点, 桥臂中存在包含低频分量的环流, 引起MMC直流侧谐波。在不对称条件下, MMC直流侧谐波大为增加, 难以忽略, 而现有的理论分析与实测数据相差较大。在分析MMC的电路拓扑、工作原理及其特性的基础上, 回顾现有MMC-HVDC系统研究, 针对MMC环流及直流侧谐波问题, 总结最新的研究进展, 指出今后有待解决的关键问题, 对MMC-HVDC谐波的研究方向作出展望。

李 蓉¹ 文 俊¹ 刘若曦² 闫 涵¹ 崔康生¹ / 1. 华北电力大学电气与电子工程学院 2. 国网北京电力公司

0 引言

经过多年的研究和众多工程实践, 基于电网换相换流器的高压直流 (Line Commutated Converter Based High Voltage Direct Current, LCC-HVDC) 输电在降低运行损耗、控制和保护技术等方面取得了长足的进步, 但是由于采用晶闸管半控器件, LCC-HVDC系统存在换相失败的风险, 需要大量滤波及无功补偿装置, 不能向无源网络供电, 也不适合向弱电网送电, 导致其发展受限^[1]。随着大功率全控器件技术的大力发展, 基于电压源换流器的高压直流 (Voltage Sourced Converter Based High Voltage Direct Current, VSC-HVDC) 输电, 即柔性直流输电, 得到了迅猛发展。VSC-HVDC系统通过控制绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 的导通和关

断, 改变交流输出电压的相角和幅值, 从而实现对交流侧有功功率和无功功率的控制, 达到功率输送和稳定电网等目的^[2-8]。1997年, ABB公司在赫尔斯扬 (Hellsjon) 试验性工程中首次实现VSC-HVDC系统成功运行, 此后ABB公司投入商业运行的直流输电工程主要采用该项技术^[9]。但传统两电平、三电平式VSC-HVDC系统存在功率器件串联不易均压、谐波含量高及运行损耗大等问题, 制约了其发展。2001年, 德国学者Rainer Marquardt及其合作者提出了基于级联结构的模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC)

拓扑, 指出这一拓扑非常适合于高电压大功率应用场合^[10-12]。该拓扑一经提出就引起了研究人员的关注, 很快应用于高压直流输电领域。基于模块化多电平换流器的高压直流 (Modular Multilevel Converter Based High Voltage Direct Current, MMC-HVDC) 输电由于具有开关频率低、换流器损耗小、谐波含量少和模块化设计等优点, 在国内外得到广泛的研究和应用^[13-15]。

2010年11月, 西门子公司研发承建的世界首个基于MMC的柔性直流输电工程Trans Bay Cable (400 MW, ± 200 kV) 投入商业运行, 在增强系统安全性和可靠性等方面显示出了良好特性^[16-17]。自此, MMC-HVDC工程在世界范围内呈现快速发展趋势。

我国建成投运的MMC-HVDC工程主要有: 我国乃至亚洲首个正式投入商用的MMC-HVDC工程——上海南汇凤



李 蓉/硕士研究生

关键词/Keywords

模块化多电平换流器 ·
柔性直流输电 ·
环流 ·
不对称工况 ·
谐波 ·

电场柔性直流输电示范工程（18 MW， ± 30 kV，2011年），其成功投运为柔性直流输电技术在我国的研究和工程应用奠定了基础^[18]；我国第一个三端柔性直流输电工程——广东南澳柔性直流输电工程（200 MW， ± 160 kV，2013年），该工程推动了我国大型风电场柔性直流输电接入技术的应用与推广^[19-20]；目前世界上投运端数最多的多端柔性直流输电工程——浙江舟山五端柔性直流输电工程（400 MW， ± 200 kV，2014年），其成功投运大大提升了我国高压直流输电产业的国际影响力和竞争力^[21]；电压和容量双双达到国际之最高的柔性直流输电工程——厦门柔性直流输电工程（1 000 MW， ± 320 kV，2014年），这也是世界上首个采用真双极接线的MMC-HVDC工程^[22-23]。

目前，国内外集中精力进行MMC-HVDC系统的工程应用开发，但MMC-HVDC技术还处于工程技术研发和初步应用阶段，其中的科学问题和内在规律尚未得到完全揭示，大量的基础理论和工程技术问题还有待深入研究。已有的对于MMC-HVDC系统的研究，大多关注其控制策略及拓扑研究，如起停控制、子模块电容电压均衡控制及子模块拓扑改进等，对MMC谐波问题鲜有关注，一般以其谐波少，不需要加装滤波器而一笔带过^[24-25]。近年来的工程实测发现，MMC-HVDC系统直流侧不仅含有低频谐波，且低频谐波含量较大，难以忽略。MMC直流侧谐波电流会对系统产生如下危害：造成设备附加发热，引起直流保护系统误动，干扰线路邻近通信系统等，直流侧谐波还会通过换流器转移到交流侧，使交直流侧谐波产生复杂交互影响，造成直流输电系统运行性能下降^[26]。因此，对MMC-HVDC系统谐波相关的研究现状进行总结分析，具有重要的理论意义和工程实用价值。

本文首先介绍MMC的结构特点，分析其工作原理与特性，简要介绍MMC环流的产生，分析了环流与MMC-HVDC系统直流侧谐波的关系。在此基础上，本文总结了在系统对称工况和不对称工况下，对MMC谐波的产生、影响因素和抑制方法等方面研究的现状，指出还有待完善的问题，

并给出可能的研究方向。

1 MMC简介

1.1 MMC电路结构及工作原理

MMC为三相桥式电路结构，如图1所示，每相由上、下两个桥臂组成，每个桥臂由 n 个完全相同的子模块SM与一个桥臂电感 L 串联构成。图2所示为子模块SM的半桥拓扑结构，该功率单元可以输出零和 u_c 两种电平。图1、图2中， u_{ap} 、 u_{an} 分别为 a 相上、下桥臂子模块总电压之和； i_{jp} 、 i_{jn} 分别为 j （ $j=a, b, c$ ）相上、下桥臂电流； u_c 为子电容 C 的电压； u_{SM} 为子模块交流端口的输出电压；全控器件（ V_1 、 V_2 ）与功率二极管（ VD_1 、 VD_2 ）反向并联。

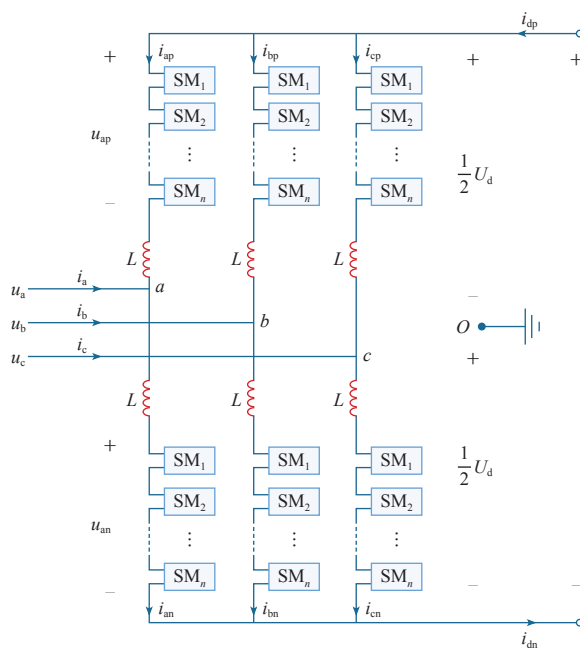


图1 MMC原理图

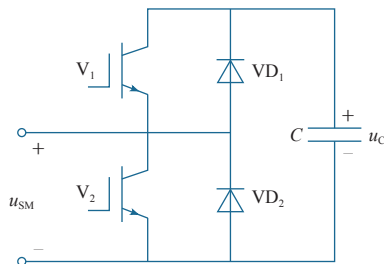


图2 半桥子模块拓扑

子模块的工作模式如表1所示。“1”代表导通，“0”代表关断。通过控制子模块中两个开关器件 V_1 、 V_2 的导通、关断状态可以选择子模块电容 C 的投入或切除，通过改变上、下桥臂子模块电容投入的数目来控制桥臂交流端口电压 u_a 、 u_b 和 u_c 。单个桥臂中处于投入状态的子模块数可以是0, 1, 2, $\dots$, n , MMC最多可以输出 $n+1$ 个电平, 以一定的方式组合获得所需要的正弦输出波形。

表1 SM工作模式

V_1	V_2	SM工作模式
0	0	闭锁 ($u_{SM}=u_c$ 或 $u_{SM}=0$)
1	0	投入 ($u_{SM}=u_c$)
0	1	切除 ($u_{SM}=0$)

任意时刻, MMC上、下桥臂投入的子模块数 n_{jp} 、 n_{jn} 应满足

$$n_{jp} + n_{jn} = n \quad (1)$$

式中, 下标 jp 、 jn 分别代表 j ($j=a, b, c$) 相上、下桥臂。

1.2 MMC性能特点

与LCC及两电平、三电平VSC相比, MMC具有以下优点^[27-28]。

1) 模块化结构。可以有效避免器件直接串联而不易均压的难题, 便于设置冗余和扩容, 且可以缩短直流输电工程建设工期, 维护工作量也大为减少。

2) 单只IGBT开关频率低。不考虑电容电压均压控制时, 理想情况下, 一个电源周期内单管只需开断一次。即使考虑电容均压控制, 也可以使开关频率降低到150 Hz左右, 从而可以有效降低功率器件的开关损耗。但由于子模块数量多, 等效开关频率高, 交流输出电压仍然非常逼近正弦波, 可以降低对交流滤波器容量的要求, 节约投资。

3) 桥臂电感一方面可以抑制电流变化率, 提供环流抑制和故障保护; 另一方面为换流器提供了能量缓冲, 防止MMC输出电压与交流网侧电压直接耦合。

4) 每相均可独立控制。当交流系统出现不平衡工况 (如发生不对称故障) 时, 仍具备一定的

运行能力。

1.3 MMC谐波产生机理

非线性的MMC不可避免地会向交直流两侧注入谐波。现有研究表明, 子模块电容电压 u_c 存在波动, 如果将上、下桥臂中 u_c 波动方向相同的部分定义为 j ($j=a, b, c$) 相等效共模波动电压源 Δu_{jcom} , 则该电压将导致同时流经上、下桥臂的电流, 此电流称为环流, 如图3、图4所示。 j 相环流表达式为

$$i_{jL} = \frac{1}{2}(i_{jp} + i_{jn}) \quad (2)$$

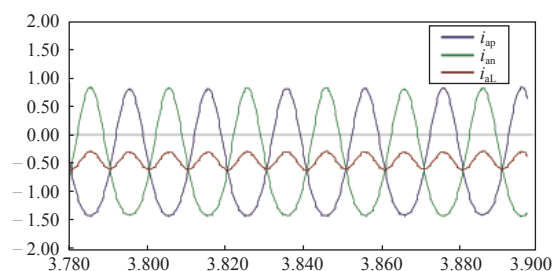


图3 a相上、下桥臂及环流波形

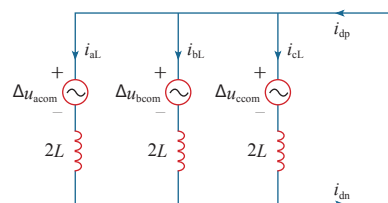


图4 MMC环流及直流线路谐波等效电路

环流中包含直流分量和偶倍频交流分量 (通常只计及二倍频分量), 又有

$$i_{jL} = I_{jd} + \sum_{k=2}^{\infty} I_{jk} \cos(k\omega_1 t + \varphi_{jk}) \quad (3)$$

式中, I_{jd} 为环流中的直流分量; k 为谐波次数, 对称情况下, $k \geq 2$ 且为偶数; I_{jk} 、 φ_{jk} 分别为 j 相 k 次环流的幅值及初相位; ω_1 为基波角频率。

由基尔霍夫电流定律可知, 任意瞬间, 直流极线中的直流电流分量为三相桥臂中环流直流分量之和, 即

$$I_{dp} = I_{dn} = I_{ad} + I_{bd} + I_{cd} \quad (4)$$

式 (3) 中, 第二部分为偶倍频的交流分量。

理想情况下（或对称条件下），具有零序特性的环流谐波电流将流入直流极线，即直流极线电流（ i_{dp} , i_{dn} ）中将含有 $2(3k) = 6, 12, 18 \dots$ 次的直流谐波电流。谐波次数越高，则谐波的数值急剧下降。

2 MMC谐波研究现状

2.1 对称条件下MMC谐波研究

对称条件是指交流系统三相对称，三相桥臂对称，每桥臂子模块数相等， u_c 相等，且控制系统对称。

现有MMC文献多针对MMC的环流及其抑制方法展开研究。MMC的环流特指仅在公共直流母线正极和负极之间或者不同相桥臂之间循环流动，不会流出到交流系统的电流，其主要作用是在同一相桥臂内或者不同相桥臂之间传递有功和无功能量^[28]。环流分量叠加在上桥臂电流或者下桥臂电流上，不仅会提高功率开关器件的额定容量，增加成本，还会造成器件过热，甚至烧毁。

文献[29]和文献[30]在分析三相桥臂电流时，将环流假定为公共直流母线电流的1/3，忽略了环流中的交流脉动分量，没有充分考虑不同相桥臂之间的能量交换。

文献[31-33]从“能量脉动”的角度分析了MMC单个桥臂的瞬时功率，从中得到子模块电容电压波动幅度的解析表达式，分析了内部环流的产生机理，从能量角度说明存在二倍频负序谐波环流，并通过环流大小提供了一种桥臂电感值的选择方法，但并没有对子模块电容电压波动的成分进行深入分析；文献[34]在此基础上设计了相应的附加控制器抑制二倍频环流，由于分析中只计及了二倍频环流，未能进一步揭示桥臂环流成分及电压波动规律，缺乏一般性。

文献[35]通过对电容电压波动进行分析，指出环流中包含有2、4和6等偶数次谐波分量，且MMC相单元总电压中存在的2次谐波与电容电压基频波动及二倍频波动有关，并以此分析得到MMC环流中的各谐波成分及其影响因素。

文献[36]考虑到实际工程中MMC子模块数目较多，采用平均开关函数分析MMC交直流侧电气量的耦合关系，对理想情况下MMC子模块电容电压波动的基本成分进行了数学推导，详细分析了子模块电容电压和内部环流通过开关函数相互影响的机制。

文献[37]对比两电平、三电平中点箝位电压源型换流器谐波产生机制及直流谐波模型，提出MMC直流侧等效为谐波电压源，并指出当三相共模电压为零序时，产生的谐波电流将流入直流线路形成直流谐波。

文献[38]在肯定环流作为相间功率平衡载体的积极作用基础上，提出一种基于MMC环流模型的环流抑制策略，无需负序坐标变换和相间解耦环节，且适用于任意相数的MMC系统，提高了环流抑制策略的通用性。

综上所述，现有研究大多止步于二倍频环流，不能得到直流侧谐波的频次、数值及其影响因素。且完全对称的条件过于理想化，使得理论分析与工程实测出现较大出入。

2.2 不对称条件下MMC谐波研究

以上文献对MMC环流的研究都是在对称的基础上进行的。近年来一些学者开始关注桥臂不对称及交流系统不对称情况下MMC的环流谐波问题。

MMC桥臂不对称可以进一步分为桥臂子模块数量不对称和桥臂电感不对称。

文献[39]阐述了MMC子模块故障的类型和影响，提出热备用和冷备用相结合的冗余设置方法来进行冗余保护，但未考虑到故障后的不对称情况，忽略了MMC内部的特性分析。文献[40]指出当一相桥臂子模块故障产生不对称时，三相都将不再对称，由此提出容错控制策略，在二倍频环流抑制基础上加入不对称运行引起的基频电压分量进行抑制。文献[41]研究了当一相MMC子模块故障时，环流中会增加基频分量和少量3次谐波分量，这使得三相环流的交流分量不为零，导致直流侧电流中包含基频分量，而当两相同时发生子模块故障时，这一基频分量值将增大，但该文未

考虑其他谐波分量,且没有分析子模块故障对其他正常工作相的影响。

文献[42]在上下桥臂阻感不对称条件下,对MMC桥臂环流进行了研究,指出此时桥臂电流中将主要增加基频环流量。

但这些研究都只限于定性分析,并未从解析计算角度说明不对称对该相环流的影响有多大,对交直流侧谐波的数值、相位有何具体影响。

当交流系统不对称时,文献[43]着重研究了交流系统发生不对称故障时MMC的控制策略,没有揭示不对称工况下,MMC桥臂环流及直流侧谐波如何变化。文献[44]将交流系统电压分解为正序、负序和零序进行分析,当交流系统电压不对称时,功率的波动将导致上下桥臂子模块能量分布不再相同,将引起子模块电容电压的不平衡,产生谐波环流。文献[45]从瞬时功率入手,研究指出交流系统不对称时,MMC桥臂电流会出现二倍频零序分量,基于理论分析,设计了交流系统不对称时的环流控制系统,有效抑制二倍频环流。

3 结束语

通过对目前关于MMC在对称和不对称工况下谐波研究的分析总结可以看出,现在国内外有研究重点关注MMC环流及其抑制,近年来也有学者开始研究MMC不对称工况下的环流,但对于MMC的环流及谐波研究并不成熟,还有许多问题亟需解决,关于MMC谐波有待深入研究的问题包括如下几方面。

1) 对称条件下的谐波研究。现有研究忽略了调制引起的高频分量的影响,可能导致理论分析与工程实测存在误差,应从理论上提供高频分量的选择原则,计及数值上难以忽略的高频分量。

2) 对MMC桥臂环流的研究较多,但对于MMC-HVDC直流侧谐波的研究未有统一论,且缺乏直流侧谐波影响因素的研究。应深入研究MMC直流侧谐波的产生机理及其影响因素,在此基础上得到行之有效的MMC直流侧谐波抑制措施。

3) 不对称工况下MMC环流谐波的研究。多从

控制角度出发,进行环流抑制。对于不对称工况对MMC运行的具体影响及此时谐波的变化研究不够深入具体,有待进一步揭示。

4) 当前的MMC-HVDC系统控制部分大多含有二倍频环流抑制手段,未来可考虑在二倍频环流抑制基础上深入研究,增加一些控制手段,使其兼顾滤波作用,有效阻断系统背景谐波传递。

5) 由于直流工程中MMC子模块数量较多,控制较为复杂,多采用几个子模块为一组,同时投入切除的方法。为使控制简化,同时引起的电容波动在可接受范围内,一组中子模块的个数选择问题较为突出。且当分组投切时,子模块电容差异被放大,现有分析中对电容电压相同的假设不再成立。关于分组投切子模块时,单个小组中子模块数量的选择及此时电容电压存在的差别对MMC-HVDC系统谐波的影响,还需要进一步研究,为工程提供理论指导。

参考文献

- [1] 赵畹君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 文俊, 张一工, 韩民晓, 等. 轻型直流输电: 一种新一代的HVDC技术 [J]. 电网技术, 2003, 27(1): 47-51.
- [3] 胡冬良, 赵成勇, 李广凯. 电压源换流器高压直流输电的进展 [J]. 南方电网技术, 2008, 2(5): 19-23.
- [4] 汤广福, 贺之渊, 滕乐天, 等. 电压源换流器高压直流输电技术最新研究进展 [J]. 电网技术, 2008, 32(22): 39-44, 89.
- [5] Nikolas Flourentzou, Vassilios G Agelidis V, Georgios D Demetriades. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.
- [6] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [7] 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.
- [8] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36 (7): 1760-1771.
- [9] List of HVDC projects [DB]. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_HVDC_projects, 2016.
- [10] Marquardt R. Stromrichterschaltungen mit verteilten energiespeichern [J]. German Patent DE, 2001, 10 (103): 31.
- [11] Marquardt R, Lesnicar A, Hildinger J. Modulares Stromrichterkonzept für netzkupplungsanwendung bei hohen spannungen [C]. Bad Nauheim: ETG-Fachtagung, 2002.
- [12] Lesnicar A, Marquardt R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range [J]. Bologna Power Tech Conference Proceedings, 2003, 3.
- [13] Andersen B R, Xu L, Horton P J, et al. Topologies for VSC transmission [J]. Power Engineering Journal, 2002, 16 (3): 142-150.
- [14] Gemmell B, Dorn J, Retzmann D, et al. Prospects of multilevel VSC technologies for power transmission [C]. Chicago: Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE, 2008: 1-16.
- [15] Marquardt R, Lesnicar A. New concept for high voltage modular multilevel converter [C]. Aachen: Power Electronics Specialists Conference, IEEE, 2004: 1-5.
- [16] HVDC systems and trans-bay cable [C]. IEEE PES, 2005.
- [17] Westerweller T, Friedrich K, Armonies U, et al. Trans bay cable-world's first HVDC system using multilevel voltage-sourced converter [C]. Paris: CIGRE Session, 2010.
- [18] 乔卫东, 毛颖科. 上海柔性直流输电示范工程综述 [J]. 华东电力, 2011, 39 (7): 1137-1140.
- [19] 陈名, 饶宏, 李立涅, 等. 南澳柔性直流输电系统主接线分析 [J]. 南方电网技术, 2012, 6 (6): 1-5.
- [20] 李扶中, 周敏, 贺艳芝, 等. 南澳多端柔性直流输电示范工程系统接入与换流站设计方案 [J]. 南方电网技术, 2015, 9 (1): 59-62.
- [21] 李亚男, 蒋维勇, 余世峰, 等. 舟山多端柔性直流输电工程系统设计 [J]. 高电压技术, 2014, 40 (8): 2490-2496.
- [22] 阳岳希, 贺之渊, 周杨, 等. 厦门 ± 320 kV 柔性直流输电工程的控制方式和运行性能 [J]. 智能电网, 2016, 4 (3): 229-234.
- [23] 高冲, 贺之渊, 王秀环, 等. 厦门 ± 320 kV 柔性直流输电工程等效试验技术 [J]. 智能电网, 2016, 4 (3): 257-262.
- [24] 刘钟淇, 宋强, 刘文华. 基于模块化多电平变流器的轻型直流输电系统 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (2): 53-58.
- [25] 韦延方, 卫志农, 孙国强. 一种新型的高压直流输电技术——MMC-HVDC [J]. 电力自动化设备, 2012, 32 (7): 1-9.
- [26] 宋强, 饶宏. 柔性直流输电换流器的分析与设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [27] 徐政. 柔性直流输电系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [28] 杨晓峰. 模块组合多电平变换器 (MMC) 研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [29] 丁冠军, 丁明, 汤广福, 等. 新型多电平VSC子模块电容参数与均压策略 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (30): 1-6.
- [30] 丁冠军, 汤广福, 丁明, 等. 新型多电平电压源换流器模块的拓扑机制与调制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (36): 1-8.
- [31] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平电压源换流器的数学模型 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 38 (24): 1-8.
- [32] 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.
- [33] Qingrui Tu, Zheng Xu, Lie Xu. Reduced switching-frequency modulation and circulating

- current suppression for modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26 (3): 2009-2017.
- [34] 屠卿端, 徐政, 管敏渊, 等. 模块化多电平换流器环流抑制控制器设计 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (18): 57-61.
- [35] 周月宾, 江道灼, 郭捷, 等. 模块化多电平换流器子模块电容电压波动与内部环流分析 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (24): 8-14.
- [36] 宋强, 刘文华, 李笑倩, 等. 模块化多电平换流器稳态运行特性的解析分析 [J]. 电网技术, 2012, 36 (11): 198-204.
- [37] 宋强, 许树楷, 罗雨, 等. 柔性直流输电系统的直流线路谐波分析方法 [C]. 2012年中国电机工程学会直流输电与电力电子专委会学术年会论文集, 2012: 1176-1182.
- [38] 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.
- [39] 管敏渊, 徐政. 模块化多电平换流器子模块故障特性和冗余保护 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (16): 94-104.
- [40] 李探, 赵成勇. MMC子模块故障下桥臂不对称运行特性分析与故障容错控制 [J]. 电机工程学报, 2015, 35 (15): 3921-3928.
- [41] Cong Zhao, Yaohua Li, Zixin Li, et al. Characteristics analyses and rebalancing method of modular multilevel converter under submodule fault conditions [C]. 2016 IEEE 7th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2016: 1-7.
- [42] 韩少华, 梅军, 郑建勇, 等. 模块化多电平换流器不对称桥臂的环流稳态分析 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34 (7): 38-42.
- [43] 管敏渊, 徐政, 潘武略, 等. 电网故障时模块化多电平换流器型高压直流输电系统的分析与控制 [J]. 高电压技术, 2013, 39 (5): 1238-1245.
- [44] 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.
- [45] 周月宾, 江道灼, 郭捷, 等. 交流系统不对称时模块化多电平换流器的控制 [J]. 电网技术, 2013, 37 (3): 622-628.

(收稿日期: 2016-12-28) **EA**

(上接第26页)

- IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25 (4): 2655-2669.
- [14] Saad H, Peralta J, Denetiere S, et al. Dynamic averaged and simplified models for MMC-based HVDC transmission systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28 (3): 1723-1730.
- [15] Saad H, Denetiere S, Mahseredjian J, et al. Modular multilevel converter models for electromagnetic transients [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29 (3): 1481-1489.
- [16] Lesnicar A, Marquardt R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range [C]. Bologna: Power Technology Conference Proceedings, 2003: 3-6.
- [17] 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.
- [18] 李瑞, 王忠旭, Derrick Holliday, 等. 基于三电平子模块的倍电复合式MMC变换器 [J]. 电源学报, 2015, 13 (6): 28-35.
- [19] 陈晓森, 刘万勋, 孔增辉, 等. 单相交/交MMC的简化模型及电容电压平衡 [J]. 电源学报, 2015, 13 (6): 36-43.

(收稿日期: 2017-03-19) **EA**