

DOI: 10.7667/PSPC170925

全直流海上风电场高升压比 DC/DC 变换技术综述

郭灵瑜, 姚钢, 周荔丹

(电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海 200240)

摘要: 采用直流汇聚、直流传输的全直流海上风电场, 可以避免使用笨重的工频交流变压器, 在功率密度、建设成本、系统损耗等方面具有较大的优势, 因此基于直流汇聚、直流传输的全直流海上风电是目前海上电能传输的研究热点。在全直流海上风电系统中, 风机端口电压需进行高变比升压后才能远距离传输, 所以高升压比 DC/DC 变换器是整个风能变换传输系统中的重要环节。首先从变比、容量、故障隔离等角度对适用于全直流海上风电的直流变换器进行需求分析。其次对各种直流变换器的拓扑实现进行总结分类, 并指出各种拓扑的优缺点以及应用前景。最后对各种拓扑结构及控制方法进行比较, 对未来适用于全直流海上风电场的高升压比直流变换器进行展望。

关键词: 全直流海上风电; 高升压比; DC/DC 变换器; 晶闸管谐振; 模块化多电平

Research review on high step-up ratio DC/DC converter for offshore DC wind farm

GUO Lingyu, YAO Gang, ZHOU Lidan

(Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion (Shanghai Jiao Tong University),
Ministry of Education, Shanghai 200240, China)

Abstract: The offshore DC wind farm with DC collection and transmission system eliminates the bulky power frequency transformer and multiple power converters. It has advantages on power density, cost and efficiency. These advantages let the pure DC system become an advisable choice of offshore wind farm. In the offshore DC wind farm, the high set-up ratio DC/DC converter is a very important part. This paper firstly analyzes the requirements of the step-up ratio, capacity and fault isolation for the DC/DC converter. Then a detailed classification is made about different kinds of DC/DC converters. The advantages and disadvantages of various DC/DC converter topologies and their prospects are pointed out. Finally, this paper compares the structure and control methods of these different topologies and affirms the future development of the high step-up ratio DC/DC converters which can be applied in the offshore DC wind farm.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61374155), Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (No. 20130073110030) and Natural Science Foundation of Shanghai (No. 18ZR1418400).

Key words: offshore DC wind farm; high step-up ratio; DC/DC converter; thyristor resonance; modular multilevel converter (MMC)

0 引言

由于全球能源紧缺, 大力发展可再生能源已是大势所趋。风能作为可再生能源的重要组成部分, 具有极高的开发利用价值。相较于陆上风电, 海上风能资源富集且靠近负荷中心, 所以大力发展海上风电产业是开发利用风能的首选。据欧洲风能协会

统计, 截至 2016 年 6 月底, 欧洲已经投入运营的海上风电场共有 82 个, 累计总装机容量为 11.5 GW^[1]。随着机组技术的改进, 6~8 MW 的大功率机组已进入试验阶段。2015 年, 我国海上风电装机数增加了 100 台, 全年总容量达到 360.5 MW, 同比增长 58.4%。截至 2015 年底中国累计装机容量为 1 014.68 MW^[2]。与此同时, 远距离大容量海上风电场已成为目前研究的重点。

在工程理论成熟度方面, 相对于陆上风电, 我国海上风电研究还处于起步阶段。大型海上风电系统的电能汇聚和传输共有三种方式: 交流汇聚-交流传输、交流汇聚-直流传输和直流汇聚-直流传输^[3]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61374155); 高校博士点专项科研基金项目资助(20130073110030); 上海市自然科学基金项目资助(18ZR1418400)

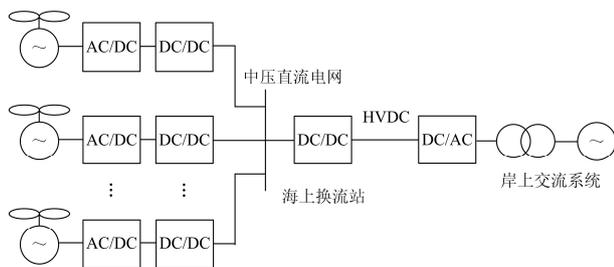
目前我国海上风电系统多采用交流汇聚、交流传输, 中间需经历多次交直流变换及升压变换, 存在着大量能耗环节, 且投入成本高、功率密度小。为了提高效率节约成本, 针对“直流汇聚-直流传输”的全直流海上风电系统研究至关重要。

全直流海上风电系统可选用的常规组网方式有直流串联与直流并联^[4]。直流串联组网方式存在一些缺陷: 1) 当系统的某一处电缆故障, 整个系统均无法正常工作; 2) 发电单元所承受的对地电压过高, 绝缘设计困难。基于系统运行的稳定性、复杂度及成本等多方面考虑, 目前更倾向于选取并联组网方式。并联组网的核心问题是如何实现高升压比直流变换。

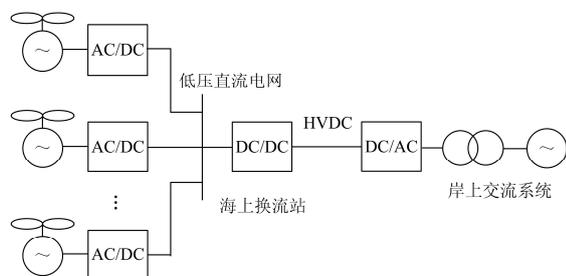
本文首先指出了全直流海上风电系统的优越性, 从变比、容量、故障隔离等角度分析高升压比直流变换器在全直流海上风电系统中的应用需求; 分类总结了目前国内外所提出的各种适用于全直流海上风电系统的高升压比直流变换器, 在分析其自身拓扑特性、控制方式以及优缺点的基础上, 再进行相互间的比较分析; 基于上述研究, 对目前适用于全直流海上风电场的高升压比直流变换器的关键问题提出了解决思路, 并对未来全直流海上风力发电的发展进行展望。

1 直流变换器的需求分析

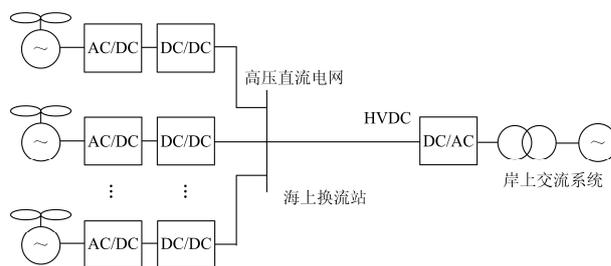
全直流海上风电场并联型组网模式共可分为三种: 两级升压型、集中升压型、机端升压型^[5], 如图 1 所示。两级升压即风力发电机输出交流电压经整流后先进行一次升压, 升至中压并在中压直流网汇聚, 随后再经二次升压以便高压传输。集中升压



(a) 两级升压系统



(b) 集中升压系统



(c) 机端升压系统

图 1 全直流海上风电场并联组网的三种模式

Fig. 1 Three parallel topologies of offshore DC wind farm

为风力发电机输出交流电压经整流后进行低压汇聚, 然后直接通过直流变换器升至高压进行传输。而机端升压组网方式为对风力发电机出口经整流后的直流电压进行升压, 然后再高压汇聚。

不同的并联方式对 DC/DC 变换器的功能需求也不完全一致, 下面针对不同的应用场合分别从变比要求、故障隔离、容量要求的角度进行详细分析。

1.1 变比要求

风力发电机输出经整流后的出口端电压、汇聚电压以及直流传输电压直接决定了直流变换器的电压变比。目前风力发电机风机出口直流电压最高为 5 kV 左右, 海上风电系统的中压汇聚母线电压一般可达到 30~36 kV, 国外并入直流母线进行传输的电压等级一般为 150~320 kV, 国内在建的海上变电站均采用 220 kV 的直流电压送出^[6], 如表 1 所示。若采用两级升压则每级的变比为 6 倍以上, 若采用一级升压总电压变比可达几十倍, 如此高的电压变比以及电压等级对直流变换器的设计提出了极高的要求。

表 1 国内外海上风电容量及电压等级

Table 1 Capacity and voltage level of offshore wind farm

工程名称	容量/MW	汇聚母线电压/kV	传输电压/kV
BARD Offshore	400	33	155
鲁能江苏东台	200	35	220
滨海北 H1	100	35	220

从变比的角度而言, 两级升压组网方式相较于其余两种组网方式更易实现。

1.2 故障隔离

应用于全直流海上风电场的直流变换拓扑需要有一定的故障隔离能力, 以应对多样的故障情况。当变换器一侧发生短路故障时, 直流变换器需要及时地隔离故障, 使得另一侧系统能够正常安全运行, 保证海上风电场及直流输电线上均不产生过电压现象。对于带有隔离变压器的隔离型直流变换器, 由于不存在直接电气联系, 在故障阻断上有一定的优势, 可通过 IGBT 的闭锁实现故障隔离^[7], 不需

要对拓扑进行额外改动。对于非隔离型直流变换器，可通过以下方式实现故障隔离：(1) 通过对称变换将单极性系统拓展为中性点接地的双极性系统^[8]，这样当一极发生短路故障时，另一极可继续正常运行；(2) 在拓扑中加入直流断路器，当 DC/DC 变换器内部发生严重故障时将变换器快速从系统中切除^[9]；(3) 在直流变换器中加入自阻尼功能限制故障电流大小，就电压源型模块化直流变换器而言，可利用全桥子模块，在发生短路故障时，通过子模块电容电压反向接入而实现对故障电流的抑制^[10]。总体而言，可从拓扑本身改进，实现系统故障隔离。

1.3 容量要求

目前，单机容量为 4~6 MW 的机组在欧洲应用较广，单机容量为 6~8 MW 的大功率机组也已经进入了试验阶段^[2]。因此若采用机端升压结构，每个风机出口侧直流变换器均需有 MW 级别的容量。若采用集中升压结构，由于能量的汇聚，流过直流变换器的容量即为所有机组并联后的系统总传输容量，达到几百兆瓦。若采用两级升压，第一级风机出口侧的直流变换器需要 MW 级容量，第二级直流变换器由于能量汇聚，则需要百 MW 级别的容量。从容量的角度而言，两级升压与集中升压都需要有百 MW 级容量的直流变换器，在实现上有一定难度，而机端升压方式在容量设计上存在优势。

全直流海上风电系统的能量传送方向固定，即从海上向岸上传送，因此所采用的直流变换器只需实现单向能量传输即可，相较于能量双向传输直流变换器而言，更加经济、节约成本。

2 直流变换的不同拓扑实现

国内外对于 DC/DC 变换器的研究多集中在中低压小功率范围，并且由于功率器件反向恢复时间的局限性，占空比一般不超过 80%，这导致传统的直流变换器只能实现 2~4 倍的电压变比^[11]。为了实现适用于全直流海上风电场的高压大变比直流变换器，通常考虑功率器件串并联、变换器子模块串并联以及多电平技术这三种方式。

2.1 基于经典直流变换器拓扑变换

传统 boost 电路通过电感电容间的充放电过程实现电压抬升，借助“伏秒平衡”原理可从稳态角度推导出输出、输入电压变比满足 $1/(1-D)$ ，其中 D 为占空比。如 boost 电路等这类经典的拓扑结构虽可实现直流变换，但因功率器件耐压能力有限，难以承受高电压，以及占空比 D 的限制，无法实现大变比升压。因此这样的经典电路难以直接应用于全

直流海上风电系统。为了克服传统 boost 电路的诸多缺陷，实现能应用于全直流海上风电的新型大变比拓扑结构，不少文献从增加功率器件的角度出发，提出了基于经典 boost 直流变换器的改进型拓扑。

文献[12]中提出了基于 boost 变换器的可适用于海上全直流风电场的直流升压方案(50 kV 至 200 kV、容量 500 MW)，如图 2 所示。图中红色、绿色虚线分别表示电感的充、放电过程，与传统 boost 电路一致。此拓扑中开关器件需要承受较高的电压应力，需通过多开关器件串联实现。

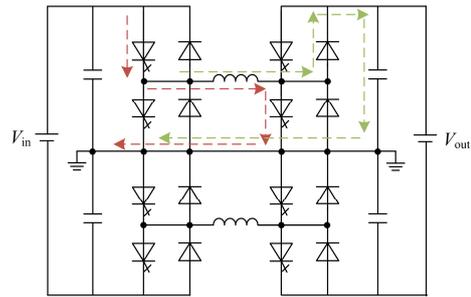


图 2 双极性双向高压直流变换器

Fig. 2 Bipolar bidirectional HV DC/DC converter

文献[13]提出输入串联型新拓扑见图 3，可应用于海上风电系统中风机出口侧升压变换。将 boost 电路与 buck/boost 电路结合可实现高变比，且可避免变压器的使用。此拓扑中开关器件的电压应力相对较小，但开关损耗以及二极管反向恢复损耗较大。

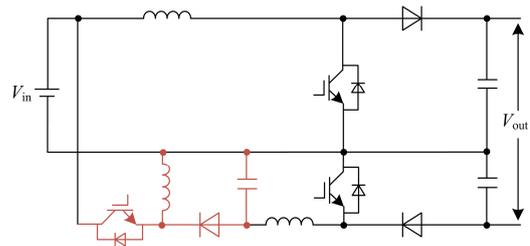


图 3 输入串联型直流变换器

Fig. 3 Series-hybrid converter

文献[14]提出了新型高增益 boost 电路见图 4，可应用于海上风电场风机出口处的直流升压。通过两个 boost 电路的组合实现更高电压增益。此拓扑中开关的电压应力降为基本 boost 电路的一半，且两 boost 电路间可自动均流。

文献[15]提出了 DBRC (Double Boost Resonant Converter) 拓扑结构见图 5，适用于两级升压的第一级，即中压直流电网。借鉴 boost 升压及谐振原理，并通过两部分串联实现了几十倍的大电压变比。但此拓扑可承受的电压应力有限。

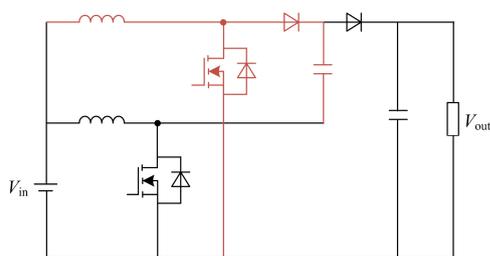


图 4 基于拓扑组合的高增益 boost 电路

Fig. 4 High step-up boost converter based on topology combination

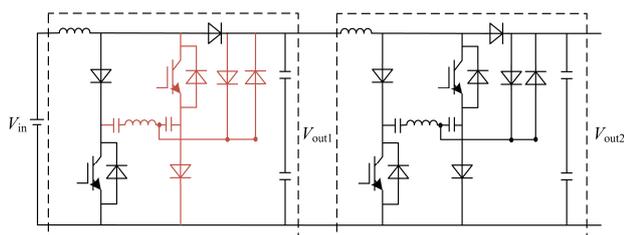


图 5 DBRC 拓扑

Fig. 5 Double boost resonant converter

文献[16]提出了Triple-lift变换器见图6。可应用于风力发电系统的发电机出口侧升压。在boost拓扑的基础上增添电容及二极管,并通过级联实现大电压变比。二极管增多,开关损耗增大。电感电容增多,使系统阶数提高,稳定性下降。

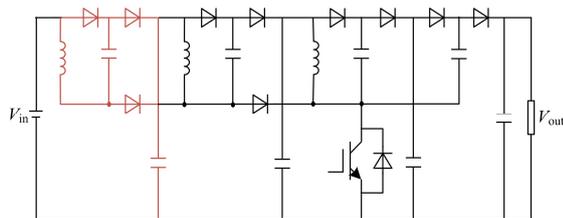


图 6 Triple-lift 变换器拓扑

Fig. 6 Triple-lift converter

基于经典直流变换器拓扑的变换虽然能实现极高的电压变比,但由于功率器件的耐压能力有限,适用于中低压直流电网。在整个全直流风电场系统中可应用于风机出口侧的一次升压。

2.2 基于谐振升压的拓扑结构

文献[17-18]提出了晶闸管谐振升压变换器拓扑。文献[17]介绍了功率单向传输的晶闸管谐振直流变换器,主要由电容、电感、晶闸管及二极管组成,如图7所示。该拓扑利用电感、电容串联谐振原理,通过晶闸管触发角控制产生激励,提高电容两端的电压,再经二极管不控整流电路得到升压后的直流电压输出。针对该晶闸管谐振变换拓扑,通常将输出电压作为被控对象进行调节控制,并利用锁

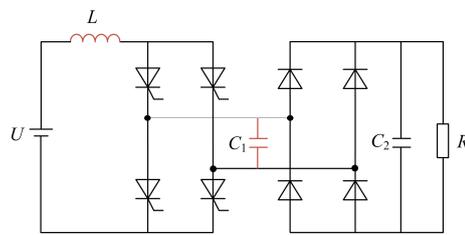


图 7 基于晶闸管谐振的单向直流变换器

Fig. 7 Unidirectional DC converter based on thyristor resonance

相环获取谐振电容电压的相位信息,进而生成晶闸管的触发信号。利用晶闸管谐振实现直流变换第一可以实现较高的电压变比,第二晶闸管采用零电流关断,开关损耗小,也可承受相对较高的电压应力,适用于兆瓦级功率传输。

文献[18]在单向晶闸管谐振变换器拓扑的基础上进行改进,见图8。在高压侧用晶闸管双向阀代替整流二极管,构成全控型整流电路,但该拓扑对高、低压侧的耐压能力要求较高,因此成本较高。由于该拓扑需采用频率控制,所以在低功率传输阶段谐波较大。

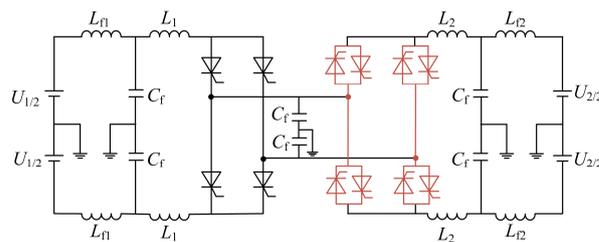


图 8 双向晶闸管谐振变换器

Fig. 8 Bidirectional converter based on thyristor resonance

文献[19]提出了一种谐振开关电容(Resonant Switched-Capacitor, RSC)直流变换器,见图9。该结构可以分为正、负模块,两个模块相互独立并且交替工作。该拓扑通过 L_{p1} 与 C_{p1} 、 L_{n1} 与 C_{n1} 等电容电感间的谐振,最终实现给 C_{p01} 、 C_{p02} 等电容充电,且

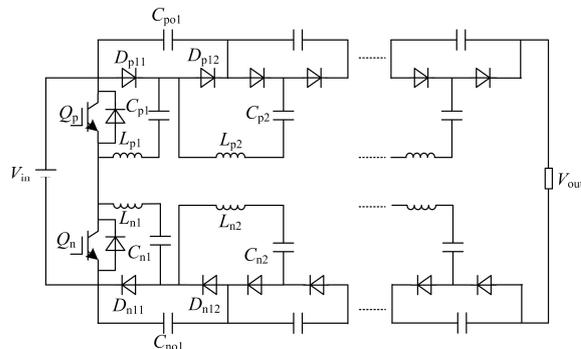


图 9 谐振开关电容直流变换器拓扑

Fig. 9 Resonant switch-capacitor DC/DC converter

每一周期电容电压均值与输入电压相等，若正、负模块数分别为 N_p 、 N_n ，则总变比即为 $(N_p+N_n+1):1$ 。由于该拓扑中功率器件采用零电流关断，所以开关损耗较小，但该拓扑需要大量的电容以及二极管，成本较高，并且输出电压受负载变化影响较大。

为了提高开关效率实现零电压开关，降低元器件的电压应力，文献[20]提出了可应用于海上风电直流并网的基于LC并联谐振的升压变换器，如图10所示。

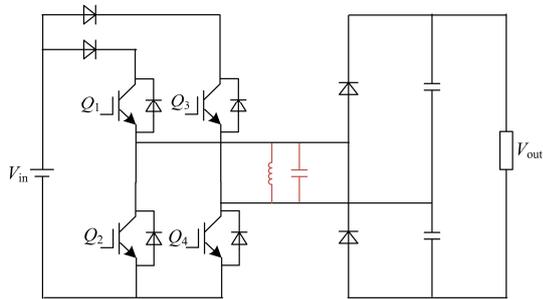


图 10 LC 并联谐振直流变换拓扑

Fig. 10 Proposed resonant step-up converter

以上一系列基于晶闸管谐振的拓扑可以实现较高的电压增益，由于晶闸管具有较好的耐压性能，可应用于高电压、大容量的场合。同时通过软开关技术，可以降低开关损耗，但是此类拓扑采用高耐压电感、电容较多，成本较高。并且该类基于谐振的拓扑结构在参数选择上存在着一定的难度，虽然原理级上得到了验证，但是否能在海上全直流风电场系统中进行应用推广还有待进一步研究。

2.3 基于输入输出串并联的拓扑结构

通过上文对直流变换器需求分析可知，适用于全直流海上风电场的直流变换器需要有较高的电压变比、耐压能力、绝缘等级，并且具有兆瓦级的容量。为降低拓扑中功率器件的电压应力以及传输能量，目前工程界多采用两种方案，分别为开关器件串联和多个DC/DC模块串并联。前者涉及开关器件间的均压及同步控制问题，工程技术难度过高，所以目前的研究更多趋向于采用后者模块间的串并联实现更高的电压变比及容量。

输入输出串并联拓扑共可分为四类，其中适用于全直流海上风电系统的共有两类，分别为输入并联输出串联(Input-Parallel-Output-Series, IPOS)和输入串联输出串联(Input-Series-Output-Series, ISOS)^[4]。针对这两种结构中子模块拓扑类型的选择，目前学术界已有一定的研究，但对于之间的优劣对比、使用范围论述较少。

文献[21]总结各种大功率隔离型DC/DC变换器

拓扑结构，并分别从电压、容量以及开关频率等角度进行了比较分析，并指出双有源全桥隔离型升压变换器(Dual Active Bridge, DAB)具有零电压开断、开关器件少、器件承受的电压应力相对较低等优势^[22]。文献[23]在各种隔离型直流变换器中选择了DAB作为子模块进行级联，如图11所示。为适应高压大容量的场合，每个子模块的输入、输出电压变比为1:1，采用输入端并联、输出端串联的形式，从而实现高电压变比。为减小开关损耗、提高开关频率，该拓扑采用软开关技术实现零电压开断。并且两两子模块间控制信号保持同步相位差，以此减小系统中的电压纹波。

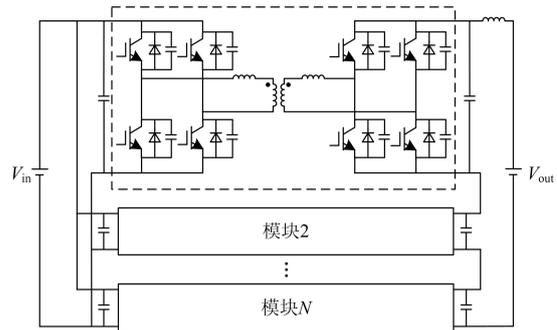


图 11 输入并联输出串联 DAB 直流变换拓扑

Fig. 11 IPOS based DAB DC/DC converter topology

文献[24]选取LLC串并联谐振器作为子模块，且子模块输入端并联、输出端串联构成新型直流升压拓扑，并将该拓扑应用于海上全直流风电场，同时还实现了风力发电机出口的最大功率跟踪控制(Maximum Power Point Tracking, MPPT)。

在控制方面，针对ISOS结构，主要考虑输入输出端的均压问题，文献[25]提出了三环控制策略，通过输出电压、输出电流的反馈调节环以及输入均压环控制，实现输入输出的均压与总输出电压的稳定。文献[26]提出了交换占空比的均压策略，但是缺少模块间的独立控制，不适用于模块数较多的场合。文献[27]提出了基于输出电压上翘特性的均压控制策略，在模块控制的独立性上有一定优势。针对IPOS结构，主要考虑各个子模块输入端均流、输出端均压问题，在具体控制实现上可直接控制各子模块的输出电压均衡，也可通过控制输入均流来控制输出均压^[28]。为了便于控制参数选取，文献[29]提出了将均压/均流控制与输出电压控制解耦合的控制方式，这利于实现模块数的增减，使得系统有较好的拓展性与冗余度。

通过子模块输入输出串并联可以实现大的电压变比，也易适用于高压大容量的场合。通过合理

的子模块拓扑优化可实现零电压开断, 从而减小开关损耗, 达到更高的开关频率, 进而减小隔离变压器体积。综上所述, 此类拓扑结构可以应用于全直流海上风电场。

2.4 基于模块化多电平的拓扑结构

模块化多电平变换器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 具有高度模块化的特性, 且易于拓展、易于实现冗余控制, 通过增减模块个数可实现较大电压变比。由于 MMC 具有公共直流母线, 可实现四象限运行。

应用于全直流海上风电场的直流变换器需要相对较高的电压变比, 因此可以采用“面对面”结构 MMC, 即将两个 MMC 以 DC/AC/DC 的方式连接, 在 AC 部分采用电力变压器进行升压, 从而实现高升压比直流变换, 如图 12 所示。相较于工频变压器, 若采用中频或高频变压器, 可以减小变压器体积和重量, 更易应用于海上风电。

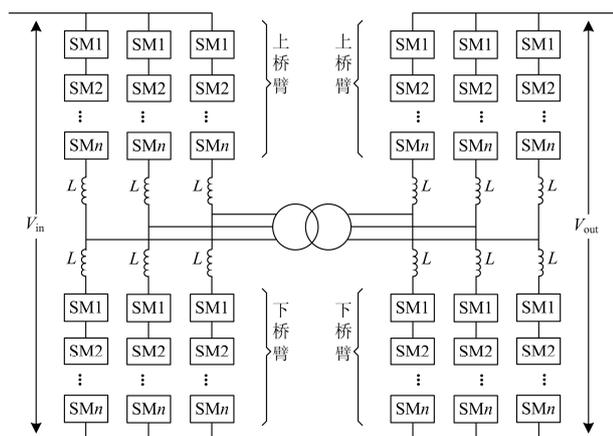


图 12 基于 MMC 的直流变换器拓扑

Fig. 12 MMC based DC/DC converter topology

为减少输出电压中的谐波含量, 文献[30]在输入侧采用 MMC 逆变的基础上, 输出侧采用移相多重化控制, 如图 13 所示, 用不控整流桥级联代替高压侧 MMC, 极大降低了成本以及体积。

传统 MMC 的子模块可以采用全桥或半桥结构, 半桥结构相较于全桥结构可节省一半开关器件数, 但半桥结构并不具有直流闭锁能力^[31]。为减少运行损耗同时提高拓扑直流闭锁能力, 2010 年 ALSTOM 公司结合两种传统 MMC 子模块结构提出新型混合式换流器即桥臂交替导通型 MMC (Alternative-Arm Multilevel Converter, AAMC)^[32], 如图 14 所示。AAMC 的每相桥臂由多个全桥子模块以及 IGBT 串联形成的串联阀组成。AAMC 拓扑的主要优势为: 每相的上、下桥臂各自工作半个周期, 相较于传统

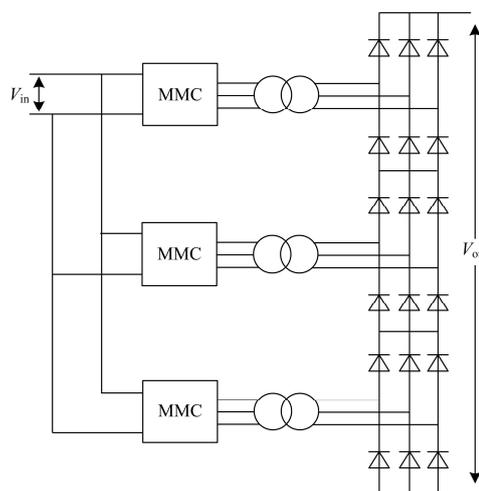


图 13 基于移相多重化直流变换器

Fig. 13 Topology of phase-shift-multiple based MMDC converter

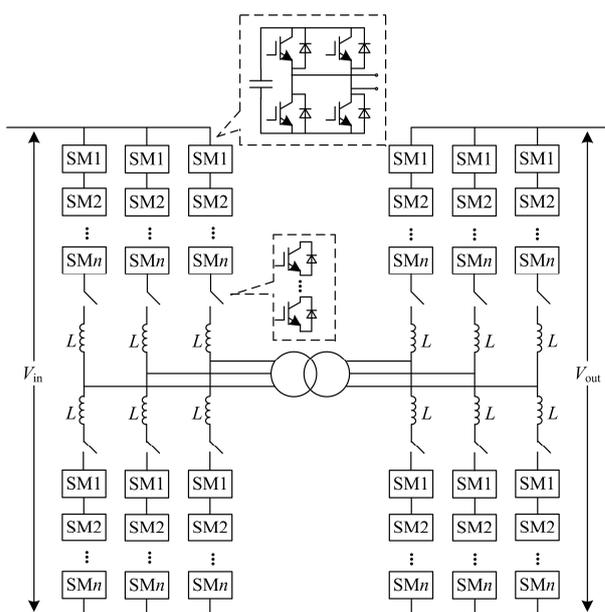


图 14 基于 AAMC 的直流变换器拓扑

Fig. 14 AAMC based DC/DC converter topology

的 MMC 获得相同电平数的输出, 所需子模块数量大为减少, 系统更为紧凑, 损耗也得到降低; 在发生直流故障时, 同相的上、下桥臂间没有直流通路, 能够有效地抑制故障电流, 阻断由直流侧故障所引起的连锁扩散^[33]。该拓扑的调制及控制方法与传统 MMC 类似, 但相对于传统 MMC 拓扑, AAMC 拓扑子模块的均压问题较难解决, 文献[34-35]提出基于重叠电流法的电容电压平衡策略, 但并未在理论上对重叠时间长短和直通电流大小做详细分析; 文献[36]提出基于三次谐波注入的电容电压平衡策略, 通过注入谐波电流主动实现各相间的能量转移和分配, 同时将子模块电压偏差控制在指定范围内; 文

献[37]提出基于换流角的电容电压控制方式，从能量平衡的角度提出换流角的计算方法。针对拓扑中的谐波问题，文献[38]进行了AAMC拓扑交流侧、直流侧谐波分析，并提出了通过两个交流侧电压相位差 30° 的AAMC在直流侧串联，从而达到消除谐波的目的。针对AAMC拓扑的故障处理问题，文献[39-40]分析了在直流故障时AAMC的运行机理、子模块电容电压平衡策略以及控制策略。但该拓扑最主要的局限在于，IGBT串联技术实现困难，所以针对AAMC的研究目前主要集中在仿真验证阶段，样机实验相对较少。

MMC拓扑若由单一的半桥子模块构成则缺少直流故障阻断能力，若均由全桥子模块构成则成本过高，为实现直流故障隔离以及提高经济性能，常采用混合子模块的形式^[41-45]。文献[41]将半桥与全桥子模块相结合，实现了直流阻断能力，也减少了开关数量。同时该文献提出了基于虚拟电阻的优化控制策略，减少了暂态不平衡电流对子模块电压平衡的影响。文献[42]将半桥子模块同钳位双子模块结合，利用钳位双子模块的闭锁模式实现系统的故障隔离。文献[43]提出了四种不同结构的自阻型子模块来隔离直流故障电流，并将此种新型子模块同半桥子模块组合，在实现隔离直流故障的同时进一步减少了MMC的器件数量。文献[44]提出了一种基于半桥和T型全桥子模块的混合型直流变换器，并利用T型子模块的负电平输出使得直流电压下降时变换器也可正常工作。文献[45]提出了具有较强电流阻断能力的新型子模块，并将其与半桥子模块结合，分析了此拓扑的调制策略与谐波特性。通过子模块混合实现MMC拓扑的故障处理能力，提高系统稳定性，是目前MMC发展的一个热门领域。

系统容量不是较高的情况，可采用单相MMC“面对面”结构实现直流变换。随着系统传输容量的提高，可通过增加MMC的相数实现。但此类通过变压器耦合的隔离型拓扑，受变压器铁芯材料、涡流损耗、磁通饱和等因素影响，所能承受的传输容量有限。为了解决这一问题，目前国内外也在研究适合高压大容量场合的直流自耦变压器，由于这种非隔离型变压器不存在磁耦合环节，所以相较于传统变压器有效地避免了铁芯损耗等问题。文献[46]提出一种基于半桥结构的非隔离型直流变换拓扑，如图15所示。它由传统的boost电路变化而来，用串联的半桥子模块代替普通boost电路中的开关部分；用IGBT与二极管组成的子模块串联代替普通boost电路中的二极管部分。由于低压直流侧的子模块本身也构成了部分高压直流侧，其结构类似于自耦变

压器，可实现较大的电压变比。同时该拓扑也可实现能量双向传输。在控制方面，该文献采用移相的方式控制各个子模块的投入与否。为了进一步提高拓扑的容量，文献[47]提出了三相自耦型拓扑，三相拓扑相对于单相能够实现更大的传输容量，更适合应用于全直流海上风电中。

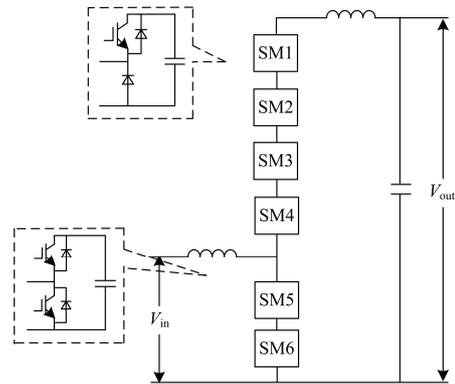


图 15 新型自耦型直流变换器

Fig. 15 Auto transform DC/DC converter

文献[48]提出了单极型推挽式的自耦型直流变换器，如图16所示。其中采用耦合电感抑制交流电流。文献[49]提出双极型推挽式自耦型直流变换器，可实现大变比以及大功率传输，适用于海上风电场中的直流汇聚。

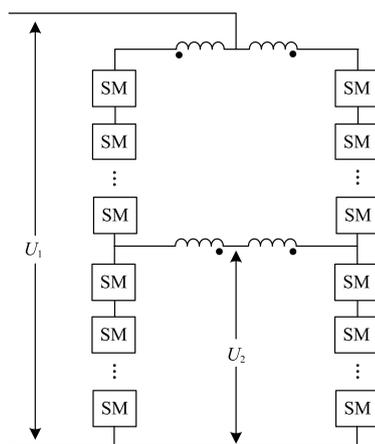


图 16 单极型推挽式直流变换器

Fig. 16 Unipolar push-pull DC/DC converter

文献[50]提出了一种直流-直流自耦变压器，该拓扑可降低所使用的换流器容量，降低运行损耗。但由于该拓扑两个不同电压等级的直流系统有直接的电气连接，难以做到全面故障隔离。文献[51]对DC/DC自耦变压器进行了拓扑优化，提高了其直流故障阻断能力，理论上该拓扑可应用于多端口的海上直流风电系统中，但其拓扑中需要中频变压器，在体积和成本上还有待改进。

文献[52]提出混合级联型直流变换器的概念, 如图17所示。然而该拓扑也涉及IGBT串联, 需承受较高的电压等级, 这在成本与实现上存在一定困难。

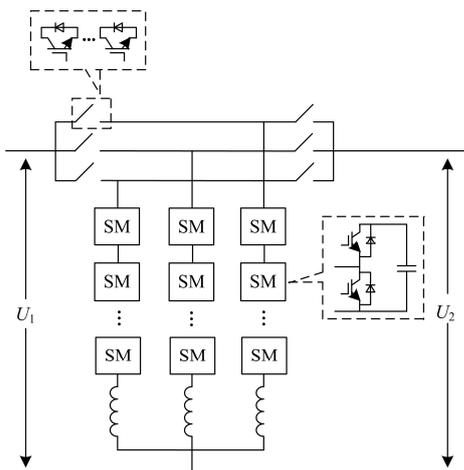


图 17 混合级联型直流变换器

Fig. 17 Hybrid cascaded DC/DC converter

为了提高模块化多电平拓扑的效率, 减少开关损耗是关键。在控制方式上优化子模块电容电压的排序算法, 可以有效减少开关管的开关动作从而实现效率的提高。具体而言, 在控制上可通过避免不必要的开关动作而减少开关损耗^[53], 或是通过给额定电容电压值设限, 只调节越限于子模块电容值, 从而减少开关损耗^[54]。

3 多种拓扑比较

拓扑可传输的容量决定了拓扑的应用范围。基于经典直流变换器变化改进而来的直流变换器以及基于晶闸管谐振升压的直流变换器虽然能实现较高的电压变比, 但其传输的能量有限, 并且受限于器件的耐压能力, 适用于风力发电机出口进行一次升压。而基于输入输出串并联以及模块化多电平的直流变换器, 通过多模块的组合可以实现较大的传输容量以及较大的电压等级, 适用于直流汇聚后的二次升压, 技术成熟后也可考虑将其应用于集中升压系统。具体比较如表2所示。

表 2 拓扑性能比较

Table 2 Comparison of different kinds of topologies

拓扑分类	传输容量	变比	适用范围
基于经典拓扑改造型	兆瓦级	十倍	风机出口侧
基于晶闸管谐振型	数十兆瓦	十多倍	两级升压系统中 低压母线侧
输入并联输出串联型	百兆瓦	几十倍	均可, 适用范围广
模块化组合型	百兆瓦	几十倍	均可, 适用范围广

针对输入输出串并联及模块化多电平这两种适用于高压大容量的拓扑类型, 可从经济成本、拓扑性能、控制复杂度等角度进行比较。从经济性而言, 基于输入输出串并联的直流变换拓扑所需的 IGBT 等开关器件较少, 成本相对较低。从拓扑性能而言, 基于输入输出串并联的拓扑结构输入输出侧均接有滤波电容, 当发生短路故障时, 会使得短路电流增加, 而基于模块化多电平的直流变换器, 可通过子模块的调整等方式实现故障隔离, 在拓扑的稳定性与可靠性上, 模块化多电平拓扑优于输入输出串并联拓扑。在控制上, 这两种类型的拓扑均需考虑子模块内部的控制以及各子模块之间的配合。输入输出串并联拓扑控制的重点在于均压/均流的实现, 难点在于各子模块参数不对称或是不同类型子模块串并联时系统稳定性分析; 模块化多电平拓扑控制的重点在于子模块电容电压的平衡, 难点在于子模块排序方式的优化及开关频率的降低。

4 总结

本文对全直流海上风电系统中高变比直流变换器的拓扑结构及控制策略进行了综述, 详细地介绍了各种可应用于全直流海上风电系统中的直流变换器拓扑, 并比较分析了各种拓扑的优缺点以及应用前景。目前针对全直流海上风电系统的研究国内还处于初级阶段, 下一步从以下方面进行思考。

1) 针对目前的全直流海上风电可选择两级升压或一级升压两种。若要采用一级升压, 则电压变比达到上百, 就目前的拓扑技术还达不到这样的要求。若采用两级升压方式进行直流变换, 前级的中压直流变换器所需要的容量相对不大, 可考虑经典直流拓扑的优化或基于谐振型的直流变换器拓扑, 后级高压直流变换则需输入输出串并联技术以及模块化多电平技术。

2) 针对基于输入输出串并联的直流变换器, 可进一步优化均压/均流控制策略, 考虑当系统子模块参数不一致或是不同类型子模块串并联时系统控制方式的选取。也可考虑通过控制环间的解耦减弱各子模块间的联系, 便于模块个数的增减与拓扑冗余设计。同时对于输入输出串并联拓扑中子模块的比较与选取也十分重要, 需考虑其故障隔离能力及效率等问题。

3) 基于模块化多电平直流变换器的研究, 重点在于隔离变压器环节的设计以及拓扑结构的优化。为了减小变压器的体积, 应提高 MMC 的频率, 而针对大容量高频变压器的研制仍是一个难题。同时当频率提高时, MMC 中 IGBT 的开关频率增大, 如何

优化控制算法降低开关频率也是一个研究热点。另外拓扑结构的优化有助于提高MMC的故障隔离能力,增加系统的稳定性,值得研究。

虽然目前全直流海上风电系统还停留在理论阶段,但是该系统不需要笨重的高频变压器以及复杂的整流、逆变过程,在效率及成本上有着极大的优势。由此可见,全直流海上风电系统是未来海上风电发展的重要方向。

参考文献

- [1] 朱小毅. 欧洲海上风电发展趋势分析及启示[J]. 风能, 2016(9): 36-41.
ZHU Xiaoyi. Analysis of the development trend of European offshore wind farm[J]. Offshore Wind Power, 2016(9): 36-41.
- [2] 中国可再生能源学会风能专业委员会. 2015 年中国风电装机容量统计[J]. 风能, 2016(2): 48-63.
CWEA. Statistics on China's wind power in 2015[J]. Offshore Wind Power, 2016(2): 48-63.
- [3] 蔡旭, 施刚, 迟永宁, 等. 海上全直流型风电场的研究现状与未来发展[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2036-2048.
CAI Xu, SHI Gang, CHI Yongning, et al. Present status and future development of offshore all-DC wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2036-2048.
- [4] 江道灼, 谷泓杰, 尹瑞, 等. 海上直流风电场研究现状及发展前景[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2424-2431.
JIANG Daozhuo, GU Hongjie, YIN Rui, et al. Research status and developing prospect of offshore wind farm with pure DC system[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2424-2431.
- [5] 李响, 韩民晓, 许东. 直流串并联海上风电机组控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 46-52.
LI Xiang, HAN Minxiao, XU Dong. Control strategy of DC parallel-series offshore wind turbines[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 46-52.
- [6] 郗鑫, 谢特列, 杜商安. 国内外海上升压变电站设计方案对比分析[J]. 中国科技成果, 2014(23): 43-46.
QI Xin, XIE Telie, DU Anshang. Comparison on design schemes for offshore wind farm at home and abroad[J]. China Science and Technology Achievements, 2014(23): 43-46.
- [7] RAHMAN M H, XU L, YAO L. Protection of large partitioned MTDC networks using DC-DC converters and circuit breakers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 170-178. DOI: 10.1186/s41601-016-0030-0.
- [8] 王新颖, 汤广福, 魏晓光, 等. 适用于直流电网的 LCL 谐振式模块化多电平 DC/DC 变换器[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1106-1113.
WANG Xinying, TANG Guangfu, WEI Xiaoguang, et al. LCL-based resonant modular multilevel DC/DC converter for DC grids[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1106-1113.
- [9] 王新颖, 汤广福, 魏晓光, 等. MMC-HVDC 输电网用高压 DC/DC 变换器隔离需求探讨[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 172-178.
WANG Xinying, TANG Guangfu, WEI Xiaoguang, et al. Discussion about the isolation of high voltage DC/DC converter used in the MMC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 172-178.
- [10] KISH G J, RANJRAM M, LEHN P W. A modular multilevel DC/DC converter with fault blocking capability for HVDC interconnects[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 30(1): 148-162.
- [11] MOHAN N, UNDELAND T M. Power electronics: converter, applications, and design[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007: 172-178.
- [12] ZHAN C, SMITH C, CRANE A, et al. DC transmission and distribution system for a large offshore wind farm[C] // 9th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2010), October 19-21, 2010, London, UK: 1-5.
- [13] DENNISTON N, MASSOUD A, AHMED S, et al. Multiple-module high-gain high-voltage DC-DC transformers for offshore wind energy systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(5): 1877-1886.
- [14] 罗全明, 闫欢, 孙明坤, 等. 基于拓扑组合的高增益 Boost 变换器[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 96-102.
LUO Quanming, YAN Huan, SUN Mingkun, et al. High step-up boost converter based on topology combination[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 96-102.
- [15] ANAYA-RUIZ G A, ZUNIGA-GARCIA L G, MORENO-GOYTIA E L, et al. High power, high-boost, resonant-type DC-DC converters as power interfaces for interconnecting wind generators to main grids from MV DC collectors: design and performance evaluation in steady state[C] // 2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe), September 8-10, 2015, Geneva, Switzerland: 1-9.

- [16] LUO F L, YE H. Positive output super-lift converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(1): 105-113.
- [17] JOVCIC D. Step-up DC-DC converter for megawatt size applications[J]. Power Electronics IET, 2009, 2(6): 675-685.
- [18] JOVCIC D. Bidirectional, high-power DC transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 2276-2283.
- [19] CHEN W, HUANG A Q, LI C, et al. Analysis and comparison of medium voltage high power DC/DC converters for offshore wind energy systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 2014-2023.
- [20] 杨波, 陈武, 曹远志, 等. 一种适用于海上风电直流并网的谐振升压变换器[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4): 129-134.
YANG Bo, CHEN Wu, CAO Yuanzhi, et al. Proposed resonant step-up DC/DC converter applied in offshore wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 129-134.
- [21] DU Y, LUKIC S, JACOBSON B, et al. Review of high power isolated bi-directional DC-DC converters for PHEV/EV DC charging infrastructure[C] // Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), September 17-22, 2011, Phoenix, USA: 553-560.
- [22] 许正平, 李俊. 双向全桥 DC-DC 变换器高效能控制研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 140-146.
XU Zhengping, LI Jun. Research and implementation of bidirectional full bridge DC-DC converter with high-efficiency control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 140-146.
- [23] SANO K, TAKASAKI M. A boost conversion system consisting of multiple DC-DC converter modules for interfacing wind farms and HVDC transmission[C] // Energy Conversion Congress and Exposition, September 15-19, 2013, Denver, USA: 2613-2618.
- [24] 尹瑞, 江道灼, 唐伟佳, 等. 基于模块化隔离型 DC/DC 变换器的海上直流风电场并网方案[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 190-196.
YIN Rui, JIANG Daozhuo, TANG Weijia, et al. An isolated modular DC/DC converter of offshore DC wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17): 190-196.
- [25] GIRI R, AYYANAR R, LEDEZMA E. Input-series and output-series connected modular DC-DC converters with active input voltage and output voltage sharing[C] // Applied Power Electronics Conference and Exposition, February 22-26, 2004, Anaheim, USA: 1751-1756.
- [26] SHA D, DENG K, LIAO X Z. Duty cycle exchanging control for input-series-output-series connected two PS-FB DC-DC converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(3): 1490-1501.
- [27] 陈武, 曹远志, 崔红芬, 等. 模块化输入串联输出串联高压直流组合系统分布式均压控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 187-195.
CHEN Wu, CAO Yuanzhi, CUI Hongfen, et al. Modular input-series output-series DC high voltage system with distributed voltage sharing control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 187-195.
- [28] 张容荣, 阮新波, 陈武. 输入并联输出串联变换器系统的控制策略[J]. 电工技术学报, 2008, 23(8): 86-93.
ZHANG Rongrong, RUAN Xinbo, CHEN Wu. Control strategy for input-parallel output-series converter systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(8): 86-93.
- [29] 陈武, 阮新波, 颜红. DC/DC 多模块串并联组合系统控制策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(7): 93-102.
CHEN Wu, RUAN Xinbo, YAN Hong. Control strategy for DC/DC multiple modules series-parallel combined systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(7): 93-102.
- [30] 王新颖, 汤广福, 贺之渊, 等. 远海风电场直流汇集用 DC/DC 变换器拓扑研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(3): 837-848.
WANG Xinying, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. Topology research of DC/DC converter for offshore wind farm DC collection system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3): 837-848.
- [31] 刘思源, 徐东旭, 梅念, 等. 直流侧故障对模块化多电平换流器的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 48-54.
LIU Siyuan, XU Dongxu, MEI Nian, et al. Research on the effect of DC side fault on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 48-54.
- [32] MERLIN M M C, GREEN T C, MITCHESON P D, et al. A new hybrid multi-level voltage-source converter with DC fault blocking capability[C] // 9th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2010), October 19-21, 2010, London, UK: 1-5.

- [33] 朱晋, 韦统振, 霍群海. 一种新型全桥变桥臂型 VSC-HVDC 变流拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 52-61.
ZHU Jin, WEI Tongzhen, HUO Qunhai. A new full-bridge alternative arm based VSC-HVDC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 52-61.
- [34] 汪枫林, 王勤, 瞿亚运. 基于重叠电流法的 AAMC 电容电压均衡策略[J]. 电气自动化, 2015, 37(5): 56-59.
WANG Fenglin, WANG Qin, QU Yayun. AAMC capacitor voltage balancing strategy based on overlap current[J]. Electrical Automation, 2015, 37(5): 56-59.
- [35] KHARADE J M, THORAT A R. Simulation of an alternate arm modular multilevel converter with overlap angle control for capacitor voltage balancing[C] // International Conference on Industrial Instrumentation and Control, May 28-30, 2015, Pune, India: 502-506.
- [36] 薛英林, 徐政, 王峰. 基于三次谐波电流注入的 AAMC 电容电压均衡策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 104-111.
XUE Yinglin, XU Zheng, WANG Feng. Capacitor voltage balancing strategy based on third harmonic current injection for the alternate-arm multilevel converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 104-111.
- [37] 冯亚东, 汪楠楠, 卢宇, 等. 基于换流角的桥臂交替导通多电平换流器电容电压控制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 71-76.
FENG Yadong, WANG Nannan, LU Yu, et al. Capacitor voltage balancing strategy based on commutation angle for the alternate-arm multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 71-76.
- [38] 冯亚东, 汪涛, 汪楠楠, 等. 桥臂轮流导通换流器谐波特性[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 118-124.
FENG Yadong, WANG Tao, WANG Nannan, et al. The harmonic characteristics of the AAMC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 118-124.
- [39] MATHEW E C, SHUKLA A. Modulation, control and capacitor voltage balancing of alternate arm modular multilevel converter with DC fault blocking capability[C] // Applied Power Electronics Conference and Exposition, March 16-20, 2014, Fort Worth, USA: 3329-3336.
- [40] 薛英林, 徐政. 稳态运行和直流故障下桥臂交替导通多电平换流器的控制策略[J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 1521-1528.
XUE Yinglin, XU Zheng. Control strategy of AAMC under steady operation and DC fault conditions[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1521-1528.
- [41] 孔明, 汤广福, 贺之渊. 子模块混合型 MMC-HVDC 直流故障穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5343-5351.
KONG Ming, TANG Guangfu, HE Zhiyuan. A DC ride-through strategy for cell-hybrid modular multilevel converter cased HVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5343-5351.
- [42] 薛英林, 徐政. C-MMC 直流故障穿越机理及改进拓扑方案[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(21): 63-70.
XUE Yinglin, XU Zheng. DC fault ride-through mechanism and improved topology scheme of C-MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(21): 63-70.
- [43] 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 Jinyu, 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.
- [44] 索之闻, 李庚银, 迟永宁, 等. 一种基于子模块混合型模块化多电平换流器的高压大功率 DC/DC 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3577-3585.
SUO Zhiwen, LI Gengyin, CHI Yongning, et al. A cell-hybrid modular multilevel converter based high-voltage high-power DC/DC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3577-3585.
- [45] 王振浩, 宋金泊, 韩子娇, 等. 基于混合子模块的 MMC 故障阻断及谐波特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 73-79.
WANG Zhenhao, SONG Jinbo, HAN Zijiao, et al. Fault blocking and harmonic characteristic analysis based on hybrid sub-module of MMC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 73-79.
- [46] WANG J, BURGOS R, BOROYEVICH D. Switching-cycle capacitor voltage control for the modular multilevel DC/DC converters[C] // Applied Power Electronics Conference and Exposition, March 15-19, 2015, Charlotte, USA: 377-384.
- [47] NORRGA S, ANGQUIST L, ANTONOPOULOS A. The polyphaser cascaded-cell DC/DC converter[C] // Energy Conversion Congress and Exposition, September 15-19, 2013, Denver, USA: 4082-4088.
- [48] FERREIRA J A. The multilevel modular DC converter[J].

- IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(10): 4460-4465.
- [49] ENGEL S P, STIENEKER M, SOLTAU N, et al. Comparison of the modular multilevel DC converter and the dual-active bridge converter for power conversion in HVDC and MVDC grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 124-137.
- [50] 林卫星, 文劲宇, 程时杰. 直流-直流自耦变压器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(36): 6515-6522.
- LIN Weixing, WEN Jinyu, CHENG Shijie. DC-DC autotransformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(36): 6515-6522.
- [51] 林卫星, 文劲宇, 程时杰. 具备阻断直流故障电流能力的直流-直流自耦变压器[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 985-994.
- LIN Weixing, WEN Jinyu, CHENG Shijie. DC-DC autotransformer capable of isolating DC fault currents[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 985-994.
- [52] YANG J, HE Z, PANG H, et al. The hybrid-cascaded DC-DC converters suitable for HVDC applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(10): 5358-5363.
- [53] 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 Qingrui, 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.
- [54] 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 Minyuan, 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.

收稿日期: 2017-06-20; 修回日期: 2017-11-08

作者简介:

郭灵瑜(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高压直流变换器; E-mail: hmguolingyu@163.com

姚 钢(1977—), 男, 通信作者, 博士, 副研究员, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用。E-mail: yaogangth@sjtu.edu.cn

(编辑 姜新丽)