

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210130

非隔离型模块化多电平 DC/DC 变换器的最小化桥臂环流控制

马文忠¹, 田洪英¹, 刘慧玉¹, 胡范青¹, 李沐书¹, 张奎同²

(1. 中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266580; 2. 山东能源集团, 山东 济宁 273500)

摘要: 用于中高压直流电压转换和直流电网互联的高压大功率直流变压器一般采用中间交流变压器, 存在损耗高和体积大等不足。对一种非隔离型的模块化多电平 DC/DC 变换器进行了研究, 与普通双有源桥式 DC/DC 变换器相比, 避免了交流变压器的存在。首先分析了此变换器的工作原理, 建立了变换器的等效数学模型。考虑子模块电容电压存在特殊的不平衡, 变换器需要引入交流循环电流, 提出了一种保证桥臂功率均衡的最小化桥臂环流的控制策略, 减小了桥臂电流的交流分量, 降低了变换器的损耗。在 Matlab/Simulink 中仿真验证了变换器的性能和最小环流控制策略的有效性。最后搭建实验平台进行了实验验证。

关键词: 模块化多电平 DC/DC 变换器; 直流电网; 能源互联网; 直流变压器

A minimized AC circulating control strategy for a non-isolated modular multilevel DC/DC converter

MA Wenzhong¹, TIAN Hongying¹, LIU Huiyu¹, HU Fanqing¹, LI Mushu¹, ZHANG Kuitong²

(1. Institute of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. Shandong Energy Group Co., Ltd., Jining 273500, China)

Abstract: Intermediate AC transformers are commonly used in high voltage high power DC transformers which are used for medium and high voltage DC conversion and interconnection of DC power grids. These bring greater loss and volume. In this paper, a non-isolated multilevel modular DC/DC converter is studied. The converter avoids the need for an AC transformer compared with the common dual active bridge DC/DC converter. This paper first analyzes the working principle of this converter and establishes an equivalent mathematical model. Because of the special imbalance of the sub-module capacitor voltage, the converter needs to introduce an AC circulating current. A minimized AC circulating control strategy is proposed, which ensures the power balance of the bridge arm, reduces the AC component of the bridge arm current and the loss of the converter. The performance of the converter and the effectiveness of the proposed control strategy are verified in a Matlab/Simulink simulation. Finally, an experimental platform is built to verify the effectiveness of the converter topology and the control strategy.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 5177216), and the Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR2018MEE040 and No. ZR2019MEE094).

Key words: modular multilevel DC/DC converter; DC grid; energy internet; DC transformer

0 引言

随着直流输电技术的发展, 直流电网逐渐成为大规模新能源并网和远距离电能传输的一个重要发展方向。高压大功率 DC/DC 变换器作为构建直流电网的关键装备得到广泛研究^[1-3]。光伏电池、风机等分布式能源设备以及电化学电池和飞轮设备产生

的是直流或非工频交流电, 这些设备接入直流电网比接入传统工频交流电网更为方便^[4-8]。模块化多电平式 DC/DC 变换器 (Modular Multilevel DC/DC Converter, DC-MMC) 作为实现分布式能源灵活接入和直流电网互联的关键技术得到关注^[9]。双有源桥 DC/DC 变换器 (Dual-Active-Bridge Converter, DAB) 可以通过调节两个交流源的相移来调节功率流动的大小和方向^[10-14]。由于器件电压和功率等级限制, 通常将 DAB 串联提高电压等级, 并联提高传输功率, 使其接入更高电压等级系统。由于其扩展方便,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (5177216); 山东省自然科学基金项目资助 (ZR2018MEE040, ZR2019MEE094)

可以设置冗余单元运行,有效减少了器件串联的难度和可靠性,适合用于高压大功率场合^[15-16]。DAB的中间变压器可提供电气隔离,具有良好的故障特性,但是不可避免地增加了变换器的重量和损耗,同时模块化结构所需子模块数庞大,成本较高,装置容量利用率低^[17-18]。通过提升双有源桥变换器的中间变压器的工作频率至中高频,可有效降低中间变压器的体积和重量,但仍然需要大量子模块,使装置利用率较低^[19-20]。针对带有中间变压器的直流变压器存在的体积大、损耗高等问题,文献[21]提出一种非隔离型的模块化多电平DC/DC变换器,省去中间变压器,并且变换器两侧共用一部分子模块,具有效率高、成本低、重量轻、占地面积小等优点。这种无变压器的DC/DC变换器体积小,适合用于海上风电场等占地面积小的场合^[22-26]。本文基于这种非隔离型的模块化多电平DC/DC变换器进行了深入研究,并提出了一种最小化桥臂环流控制策略,在Matlab/Simulink中进行了仿真验证,最后搭建实验平台进行验证。

1 非隔离型DC-MMC工作原理

1.1 工作原理

两相单级半桥非隔离型DC-MMC的拓扑结构如图1所示。直流侧 V_{dc1} 为高压侧,直流侧 V_{dc2} 为低压侧。DC-MMC每相桥臂包括一个上桥臂和一个下桥臂。每个桥臂由 N 个相同的半桥子模块和一个桥臂电感 L_a 组成。每相桥臂的输出通过滤波电感 L_m 连接到低压侧。通过将两个单极DC-MMC对称连接,图1的单极型结构可以拓展为双极型结构;另外,本文的分析是基于单极型的,但对于双极型拓扑分析同样有效。应用于大功率传输的情况时,可以通过增加桥臂相数 M 增加变换器的传输功率,每相的交流分量相差的角度为 $2\pi/M$ 。为了降低输出

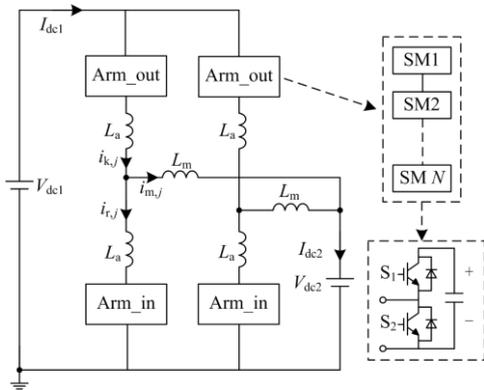


图1 单极非隔离型DC-MMC变换器

Fig. 1 Unipolar non-isolated DC-MMC converter

电流的纹波分量,滤波电感的选值一般较大,滤波电感值远远大于桥臂电感值。如图1所示, k 表示上桥臂支路, r 表示下桥臂支路, m 表示滤波电感支路, $j \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。

非隔离型DC-MMC通过在桥臂中注入高频交流环流,使相邻内、外桥臂间进行能量交换,避免了子模块电容电压的单向变化,从而实现桥臂电容电压的平衡和桥臂能量的双向流动。因此,交流环流是保证直流MMC正常运行的必要条件。

每个半桥子模块都可以提供两种电压,即零和子模块电容电压,其取决于半桥子模块两个开关管的状态。当 $S_1=1, S_2=0$ 时,子模块电容串入电路,当 $S_1=0, S_2=1$ 时,子模块电容被旁路。每个桥臂的输出电压通过控制桥臂中所有子模块的开关工作状态得到。正常运行时,每个桥臂的电压由直流量和交流分量组成,下桥臂的电压由 V_{dc2} 决定,上桥臂的电压由 $V_{dc1}-V_{dc2}$ 决定。其中直流电压用于驱动直流电流,使功率在高压侧和低压侧间双向流动。交流电压分量用于驱动交流环流,用以交换上下桥臂间的交流有功功率。如图2所示,直流电流的流通过程如蓝色虚线所示,交流电流的流通过程如红色虚线所示。桥臂功率交换方向通过调整下桥臂交流电压超前上桥臂交流电压角度 φ 决定,并且这种非隔离型DC-MMC变换器可以实现功率的双向传输,功率传输方向与相位差的关系如式(1)所示,假设 $P>0$ 时功率由高压侧向低压侧传输。

$$\begin{cases} \varphi \in \left(\frac{\pi}{2}, \pi \right), P > 0 \\ \varphi \in \left(\pi, \frac{3\pi}{2} \right), P < 0 \end{cases} \quad (1)$$

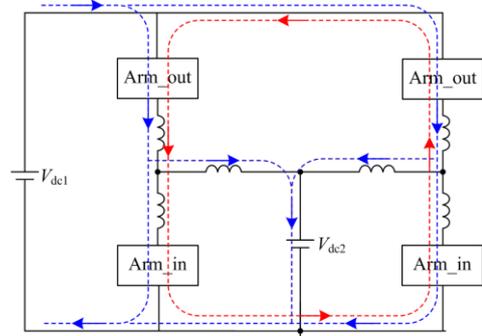


图2 非隔离型DC-MMC变换器工作原理

Fig. 2 Operating principle of non-isolated DC-MMC converter

1.2 数学模型分析

为了简化分析,假设:每个桥臂中的子模块电容电压已经由排序等算法实现平衡;桥臂电压和电

流仅由直流分量和基频分量组成, 忽略其他次谐波分量; 输出滤波器为理想滤波器, 即滤波器基频阻抗足够大, 基频交流分量完全被滤除, 输出电流中只有直流分量。以单相 DC-MMC 为研究对象, 对变换器进行研究。

简化的半桥型 DC-MMC 等效电路图如图 3 所示。变换器的电压变比 D 如式(2)所示, 传输功率 P 定义如式(3)所示。

$$D = V_{dc2} / V_{dc1} \quad (2)$$

$$P = V_{dc2} I_{dc2} \quad (3)$$

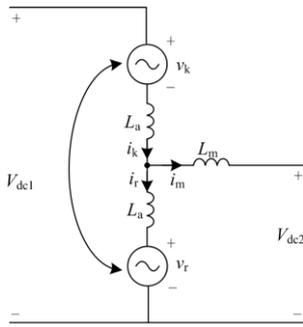


图 3 非隔离型 DC-MMC 变换器等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of non-isolated DC-MMC converter

将上桥臂电压 v_k 和下桥臂电压 v_r 分解为直流和交流两部分, 如式(4)和式(5)所示, 可得到上桥臂电流 i_k 、下桥臂电流 i_r 和滤波电感支路电流 i_m , 如式(6)一式(8)所示。

$$v_k = V_{dc1} - V_{dc2} + |v_{ac}^k| \sin(\omega t) \quad (4)$$

$$v_r = V_{dc2} + |v_{ac}^r| \sin(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

$$i_k = \frac{I_{dc2}}{M} - \frac{(X_{La} + X_{Lm})v_{ac}^k + X_{Lm}v_{ac}^r}{j(X_{La}^2 + 2X_{La}X_{Lm})} \quad (6)$$

$$i_r = \frac{I_{dc2}}{M} \left(\frac{V_{dc2}}{V_{dc1}} - 1 \right) - \frac{(X_{La} + X_{Lm})v_{ac}^r + X_{Lm}v_{ac}^k}{j(X_{La}^2 + 2X_{La}X_{Lm})} \quad (7)$$

$$i_m = \left(\frac{X_{La}}{X_{La} + X_{Lm}} \right) \frac{v_{ac}^r - v_{ac}^k}{j(X_{La} + \frac{X_{La}X_{Lm}}{X_{La} + X_{Lm}})} \quad (8)$$

上、下桥臂功率可由桥臂的电流和电压得到, 如式(9)所示, 上桥臂的功率 P_{ac}^k 与下桥臂的功率 P_{ac}^r 大小相等, 方向相反, 变换器每相需传输的直流功率 P_j 如式(10)所示。

$$P_{ac}^k = -P_{ac}^r = \frac{-X_{Lm} |v_{ac}^k| |v_{ac}^r| \sin \varphi}{X_{La}^2 + 2X_{La}X_{Lm}} + \frac{j \left[(X_{La} + X_{Lm}) |v_{ac}^k|^2 + |v_{ac}^k| |v_{ac}^r| \cos \varphi \right]}{X_{La}^2 + 2X_{La}X_{Lm}} \quad (9)$$

$$P_j = \frac{P}{M} (1 - D) \quad (10)$$

基于建立的数学模型, 可以对 DC-MMC 的闭环控制策略进行研究。

2 DC-MMC 的最小化桥臂环流控制

为了实现 DC-MMC 的正常运行, 闭环控制的目标主要包括抑制桥臂子模块的电容电压波动, 最小化桥臂环流和控制输出侧电流。

子模块电容电压存在两种不平衡类型, 包括同一桥臂间的电容电压不平衡和上下桥臂之间的电容电压存在偏差。同一桥臂内子模块电容电压的不平衡是由充放电不均造成的, 最常见的解决方法是加入基于桥臂电流方向的排序算法。上下桥臂之间子模块电容电压的偏差是非隔离型 DC-MMC 独有的。直流在桥臂间的流动使上下桥臂的某一桥臂子模块电容器中的能量逐渐消耗, 另一桥臂能量则逐渐增加, 导致上下桥臂的平均电压偏离标称值。为了抵消这种不平衡, 变换器利用控制交流循环电流使上下桥臂之间进行有功功率交换。稳态运行下, 上下桥臂产生一个交流电压驱动交流电流, 产生一个直流电压驱动直流电流。为了保持上下桥臂的功率平衡, 使子模块电容电压偏差最小, 单个桥臂的直流功率和交流功率之和必须等于零, 则上、下桥臂的功率满足式(11)。

$$\frac{P}{M} (1 - D) - \frac{X_{Lm} |v_{ac}^k| |v_{ac}^r| \sin \varphi}{X_{La}^2 + 2X_{La}X_{Lm}} = 0 \quad (11)$$

由于滤波电感值远大于桥臂电感值, 上下桥臂能量平衡条件可由式(11)简化为

$$\frac{P}{M} (1 - D) = \frac{|v_{ac}^k| |v_{ac}^r| \sin \varphi}{4X_{La}} \quad (12)$$

由式(12)可以看出, 在 DC-MMC 的正常工作状态下, 其中 P 、 M 、 D 、 X_{La} 均为固定值, 因此可以通过控制 $|v_{ac}^k|$ 、 $|v_{ac}^r|$ 和 φ 注入环流实现上下桥臂能量的均衡控制。由于内外桥臂电压的交流分量幅值存在以下关系:

$$|v_{ac}^k| = k |v_{ac}^r| \quad (13)$$

$|v_{ac}^k|$ 和 $|v_{ac}^r|$ 可看作一个控制变量, 因此 DC-MMC 的桥臂能量均衡控制存在两种控制策略:

1) 控制 $|v_{ac}^k|$ 和 $|v_{ac}^r|$ 为常量, 调节相角差 φ 实现能量均衡控制;

2) 控制相角差 φ 为常量, 调节 $|v_{ac}^k|$ 和 $|v_{ac}^r|$ 实现能量均衡控制。

以上两种方法都可以实现 DC-MMC 的桥臂能量均衡控制, 方法 2) 可以通过将 $|v_{ac}^k|$ 和 $|v_{ac}^r|$ 为最大值实现最小化环流和避免过调制, 因此选用相角差 φ 作为控制变量可以实现控制目标最优。非隔离型 DC-MMC 的桥臂的调制信号的参考值如式(14)所示。

$$\begin{cases} v_k^{\text{ref}}(t) = v_{\text{dc},k}^{\text{ref}} + |v_{\text{ac},k}^{\text{ref}}| \sin(\omega t) \\ v_r^{\text{ref}}(t) = v_{\text{dc},r}^{\text{ref}} + |v_{\text{ac},r}^{\text{ref}}| \sin(\omega t + \varphi_{\text{ref}}) \end{cases} \quad (14)$$

为实现最小化环流, 取上桥臂和下桥臂的交流电压幅值相等, 则内外桥臂和水平桥臂电压参考值如式(15)一式(17)所示。最后再结合式(12)得出开环控制的相角差。

$$v_{\text{dc},k}^{\text{ref}} = V_{\text{dc}1} - V_{\text{dc}2} \quad (15)$$

$$v_{\text{dc},r}^{\text{ref}} = V_{\text{dc}2} \quad (16)$$

$$v_{\text{ac},k}^{\text{ref}} = v_{\text{ac},r}^{\text{ref}} = \min \left\{ |v_{\text{dc},k}^{\text{ref}}|, |v_{\text{dc},r}^{\text{ref}}| \right\} \quad (17)$$

基于上述要求, 最小化桥臂环流的 DC-MMC 的控制框图如图 4 所示。其中功率平衡控制器通过上下桥臂子模块电容电压和标称值之间的误差经过滤波器和 PI 控制器产生 φ_{ref} , 驱动交流电流, 实现桥臂能量的平衡控制。输出电流控制器通过输出电流和额定值之间的差值经过 PI 控制器产生直流电压分量的额定值来传输直流功率。为了使交流循环电流最小化, 利用式(17)得到交流电压分量的幅值。

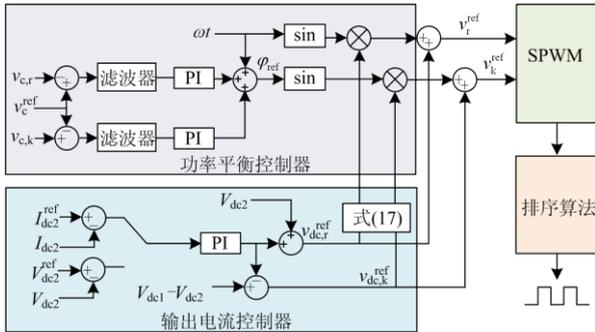


图 4 非隔离型 DC-MMC 控制框图

Fig. 4 Control block diagram of non-isolated DC-MMC converter

得到桥臂电压各个分量的参考值后, 通过载波移相模块产生 SPWM 信号, 桥臂触发信号送到排序算法模块, 经过排序后对触发信号进行重新分配, 得到最终的触发信号送到子模块的开关管^[27-29]。

3 仿真验证

为了验证非隔离性 DC-MMC 变换器的性能和控制策略的正确性, 在 Matlab/Simulink 环境下搭建了单极两相非隔离型 DC-MMC 仿真模型, 仿真参

数如表 1 所示。

表 1 非隔离型 DC-MMC 变换器仿真参数

Table 1 Simulation parameters of non-isolated DC-MMC converter

参数名称	数值
输入侧电压 $V_{\text{dc}1}$	8.8 kV
相桥臂数量 M	2
桥臂子模块数量 N	4
桥臂电感 L_a	0.8 mH
滤波电感 L_m	0.8 H
子模块电容 C_H	750 μF
子模块电容电压 V_c	2 200 V
工作频率 f	150 Hz
载波频率 f_c	5 000 Hz

如图 5 所示, 为了验证两个有源直流网络间功率传输能力的仿真结果, DC-MMC 的低压侧和高压侧由两个不同电压水平的电压源代替, 模拟两个直流电网的互联。上、下桥臂电压如图 6 所示, 开始运行时, 计算得到 $\varphi=178.2^\circ$ 。在 2.5 s 时突然增大一倍的传输功率, 二次侧电流参考值由 100 A 突增至 200 A。如图 5 所示, 在动态过程中, 子模块电容电压开始波动, 最大波动为 100 V, 最终稳定在参考值 2 200 V 附近, 输出电压保持不变, 桥臂电流

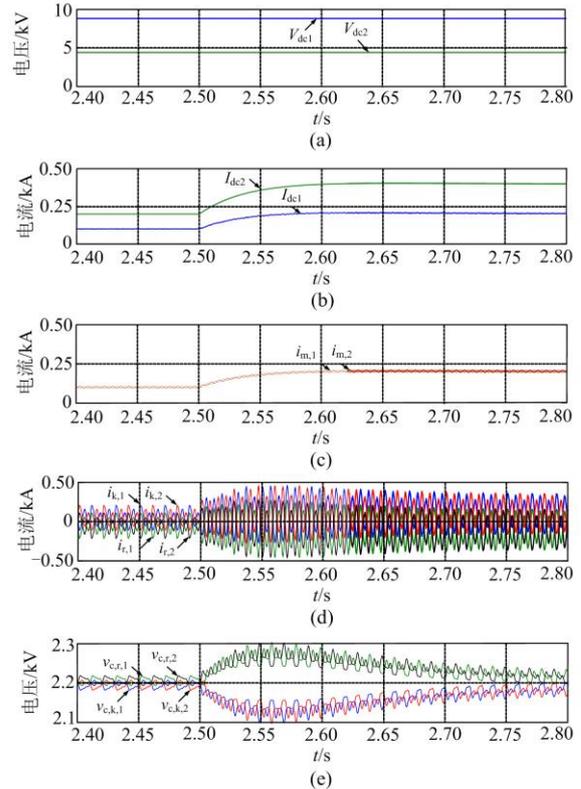


图 5 $D=0.5$ 时功率突变仿真结果

Fig. 5 Simulation results of power abrupt change when $D=0.5$

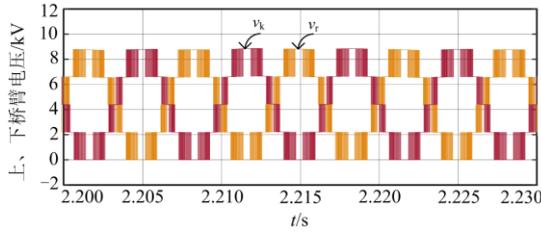


图 6 上下桥臂电压波形

Fig. 6 Voltage waveforms of upper and lower bridge arms

增大, 输出侧电流逐渐稳定至 200 A, 较好地验证了变换器以及控制策略的有效性。

如图 7 和图 8 所示, 变换器利用两种控制策略使 DC-MMC 变换器同样传输 4.4 MW 的功率。如图 7(b)和图 8(b)所示, 传统控制和最小化桥臂环流控制的直流侧电流基本相差不大。如图 7(c)和图 8(c)所示, 以上桥臂电流为例, 传统控制策略的上桥臂电流的正向峰值为 750 A, 所提出的最小化桥臂环流控制的上桥臂电流正向峰值为 500 A; 相比之下, 所提

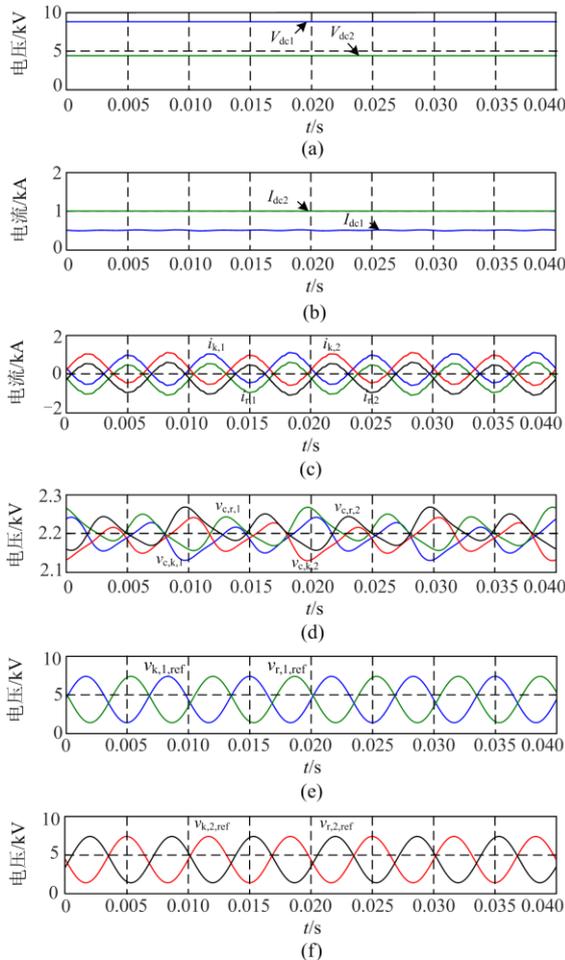


图 7 传统控制波形图

Fig. 7 Waveforms using conventional control strategy

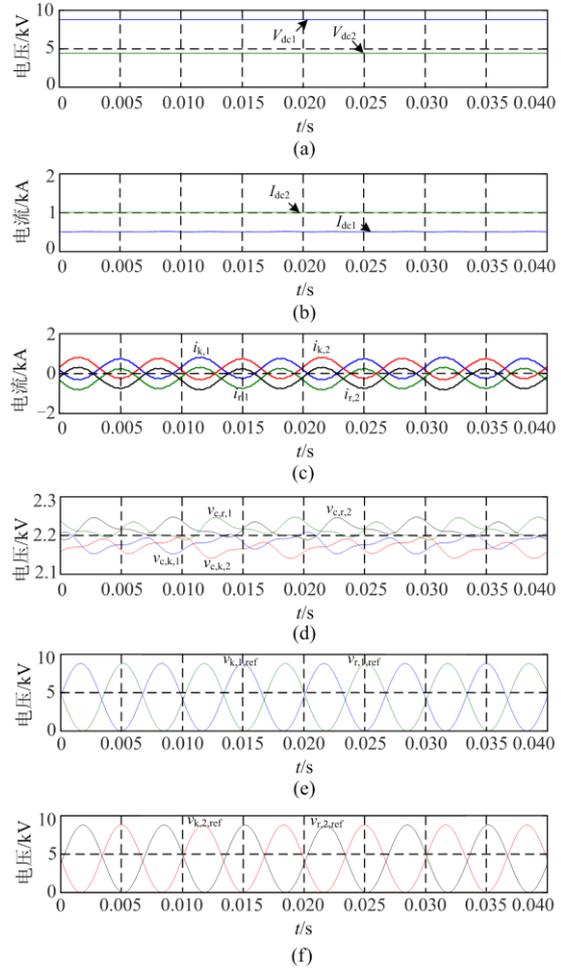


图 8 最小化桥臂环流控制波形图

Fig. 8 Waveforms using minimized AC circulating control strategy

出的控制策略在这种情况下降低了约 50% 的桥臂电流交流分量。此外, 由于减小了交流循环电流, 该控制策略产生的子模块电容电压纹波减小。传统控制与最小化桥臂环流控制效果对比如表 2 所示。

表 2 传统控制策略与最小化桥臂环流控制策略的比较

Table 2 Comparison between conventional control strategies and the proposed strategy

控制策略	桥臂电流峰值/A	子模块电容电压波动/V
传统控制	2 000	100
最小化桥臂环流控制	1 000	50

4 实验平台验证

为了进一步确认非隔离型 DC-MMC 变换器和所提控制策略的有效性, 搭建了一个实验平台。硬件平台如图 9 所示。硬件平台包括两部分: 主电路和控制电路。主电路包括直流源、半桥 MMC 子模

块、电感、电阻负载；控制电路包括主控制器 STM32、辅助控制器 FPGA、子模块控制器 CPLD。主控制器 STM32 采集直流输出电流并产生调制信号将桥臂电流极性和调制信号给 FPGA，同时接收 FPGA 上传子模块电容电压。FPGA 将调制波和载波进行比较产生 PWM 波下发给子模块控制器 CPLD，同时接收子模块电容电压。硬件实验平台各参数如表 3 所示。

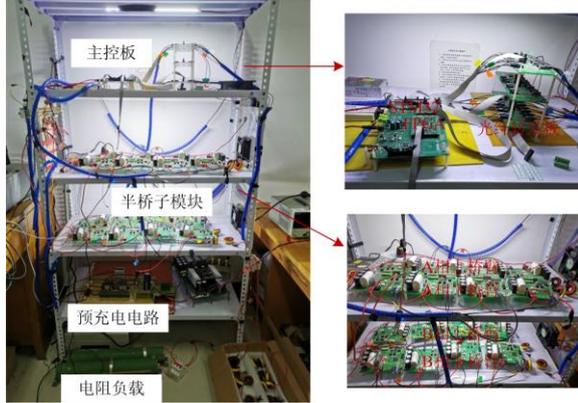


图 9 硬件实验平台

Fig. 9 Hardware experiment platform

表 3 非隔离型 DC-MMC 变换器实验参数

Table 3 Experimental parameters of non-isolated DC-MMC converter

参数名称	数值
输入侧电压 V_{dc1}	100 V
相桥臂数量 M	2
桥臂子模块数量 N	4
桥臂电感 L_a	2 mH
滤波电感 L_m	12 mH
子模块电容 C_H	1 880 μ F
子模块电容电压 V_c	25 V
工作频率 f	50 Hz
载波频率 f_c	1 000 Hz

由于实验室的限制，只有一个直流电源和电阻被应用于无源网络的情况。在本实验中，非隔离型 DC-MMC 变换器需要将 100 V 的直流电压转换为恒定 40 V 的无源网络。图 10 为一相的上、下桥臂电压波形，下桥臂电压超前上桥臂电压接近 180° ，直流源向电阻负载传输功率。图 11 为直流侧电流波形，变换器开始运行时首先传输 160 W 的功率，输出侧电流纹波含量较小，稳定在 4 A 附近，输入侧电流叠加了明显的交流分量；变换器稳定运行一段时间后，突减一半的负载，变换器的传输功率减至 80 W，所以输入、输出侧电流直流分量变为之前的

一半，并且输入侧电流的交流分量明显变小。为保持桥臂功率平衡，变换器的桥臂电流减小，其直流分量也减至之前的一半，相应地，子模块电容电压的波动幅度降低。由图 12 和图 13 对比可知，在最小化桥臂环流控制下，桥臂电流峰值更小，上、下桥臂的子模块电容电压更接近标称值，波动更小，输出侧电压也更平稳。在整个动态过程中，二次侧电压保持恒定，子模块电容电压保持平衡，验证了非隔离型 DC-MMC 变换器和最小化桥臂环流控制策略的有效性。

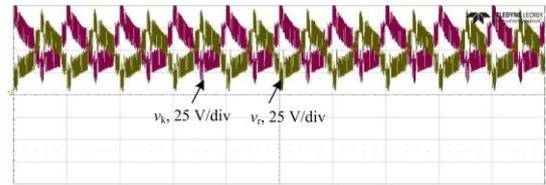


图 10 上、下桥臂电压实验波形

Fig. 10 Experimental waveforms of up/down arm voltages

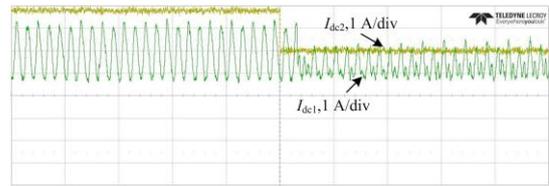
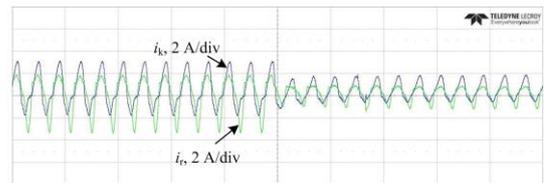
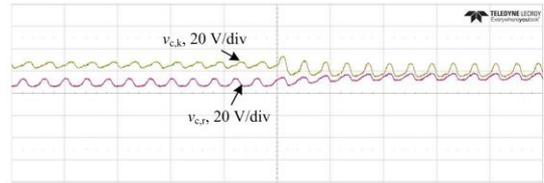


图 11 输入、输出侧电流实验波形

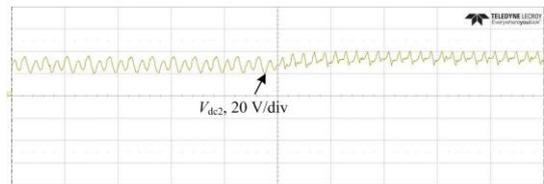
Fig. 11 Experimental waveforms of DC currents of input/output side



(a) 上、下桥臂电流



(b) 上、下桥臂子模块电容电压



(c) 输出侧电压

图 12 传统控制实验波形

Fig. 12 Experimental waveforms of conventional control strategy

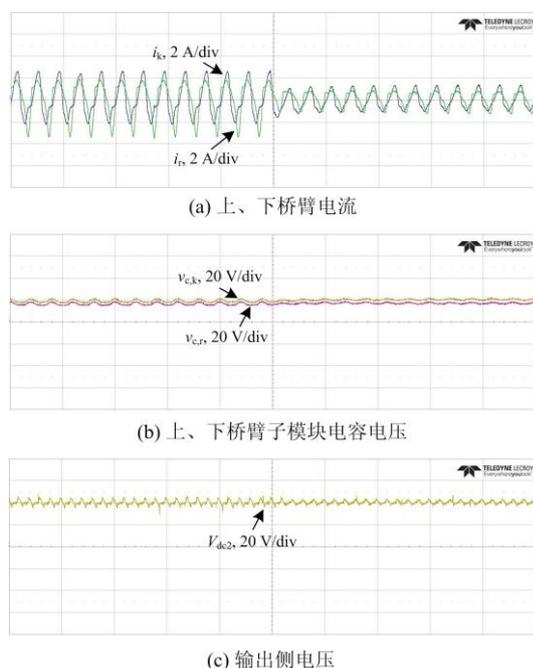


图 13 最小化桥臂环流控制实验波形

Fig. 13 Experimental waveforms of minimized AC circulating current control strategy

5 结论

本文研究了一种非隔离型 DC-MMC 变换器, 提出了一种最小化桥臂环流的控制策略保证直流变换器的正常运行。通过仿真和实验结果验证了所提出的控制策略能够控制传输功率, 保持子模块电容电压的平衡, 并使交流循环电流最小。由于实验条件有限, 滤波电感偏小, 桥臂电流中存在谐波畸变, 输出电压存在微小的波动, 一次侧输入电流也存在叠加的交流分量, 有待改进实验条件。另外, 这种非隔离型 DC-MMC 变换器只能隔离高压侧的故障, 低压侧的故障需要通过进一步研究采用全桥子模块等拓扑结构的模块单元进行隔离。

参考文献

- [1] 杨晓峰, 郑琼林, 林智钦, 等. 用于直流电网的大容量 DC/DC 变换器研究综述[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 670-677.
YANG Xiaofeng, ZHENG T Q, LIN Zhiqin, et al. Survey of high-Power DC/DC converter for HVDC grid application[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 670-677.
- [2] 杨波, 庄俊, 姚运昌, 等. 一种可阻断直流故障电流的双逆阻型 MMC 研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 39-46.
YANG Bo, ZHUANG Jun, YAO Yunchang, et al. A dual reverse blocking sub-module based MMC with DC fault current blocking capability[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 39-46.
- [3] 焦瑞浩, 丁剑, 任建文, 等. 适应大规模清洁能源并网和传输的未来新型直流电网研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(6): 9-18.
JIAO Ruihao, DING Jian, REN Jianwen, et al. Future new DC power grids for large-scale clean energy integration and transmission[J]. Smart Power, 2019, 47(6): 9-18.
- [4] 索之闻, 李庚银, 迟永宁, 等. 适用于海上风电的多端直流变电站及其主从控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 16-23.
SUO Zhiwen, LI Gengyin, CHI Yongning, et al. Multi-port DC substation for offshore wind farm integration and its master-slave control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 16-23.
- [5] ALASSI A, BAÑALES S, ELLABBAN O, et al. HVDC transmission: technology review, market trends and future outlook[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 112: 530-554.
- [6] GUAN M. A series-connected offshore wind farm based on modular dual-active-bridge (DAB) isolated DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(3): 1422-1431.
- [7] 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 converters for offshore wind farm DC collection systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3): 837-848.
- [8] SONG Guobing, HOU Junjie, GUO Bing, et al. Pilot protection of hybrid MMC DC grid based on active detection[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 82-96. DOI: 10.1186/s41601-020-0152-2.
- [9] 周保荣, 李选平, 杨健, 等. 向无源电网供电的 MMC-HVDC 稳态运行区域分析[J]. 智慧电力, 2020, 48(6): 98-104.
ZHOU Baorong, LI Xuanping, YANG Jian, et al. Analysis of steady operation region of MMC-HVDC connected to passive network[J]. Smart Power, 2020, 48(6): 98-104.
- [10] TODORCEVIC T, BAUER P, FERREIRA J A, et al. A modulation strategy for wide voltage output in DAB-based DC-DC modular multilevel converter for DEAP wave energy conversion[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(4): 1171-1181.
- [11] 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, 2014, 30(1): 124-137.

- [12] 安峰, 宋文胜, 杨柯欣. 电力电子变压器的双有源全桥 DC-DC 变换器模型预测控制及其功率均衡方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(13): 3921-3929, 4034.
AN Feng, SONG Wensheng, YANG Kexin. Model predictive control and power balance scheme of dual-active-bridge DC-DC converters in power electronic transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3921-3929, 4034.
- [13] NIE Qi, HU Haoliang, LI Dengyun, et al. Transient characteristics verification method for DC transformer used in flexible HVDC system[J]. Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 180-187.
- [14] 王新颖, 汤广福, 陈宇, 等. 一种模块化多电平 DC/DC 变换器的基频调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1987-1998.
WANG Xinying, TANG Guangfu, CHEN Yu, et al. A fundamental frequency modulation for module multilevel DC/DC converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1987-1998.
- [15] 卢林煜, 王鲁杨, 柏扬, 等. 面向能源互联网的固态变压器中双有源桥直流变换器研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 141-150.
LU Linyu, WANG Luyang, BAI Yang, et al. Research on dual-active-bridge DC-DC converter in solid state transformer for energy internet[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 141-150.
- [16] ENGEL S P, SOLTAU N, STAGGE H, et al. Dynamic and balanced control of three-phase high-power dual-active bridge DC-DC converters in DC-grid applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1880-1889.
- [17] QIN H, KIMBALL J W. Solid-state transformer architecture using AC-AC dual-active-bridge converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(9): 3720-3730.
- [18] 赵钰彬, 赵兴勇, 陆维, 等. 基于双重移相控制的直流微电网双主动全桥 DC/DC 变换器[J]. 广东电力, 2019, 32(1): 60-67.
ZHAO Yubin, ZHAO Xingyong, LU Wei, et al. Dual active full-bridge DC/DC converter based on dual phase-shift control in DC micro-grid[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(1): 60-67.
- [19] CUI Y, CHEN Y, KANG Y, et al. Comparison study of the fundamental switching frequency modulation for DC-DC modular multilevel converter[C] // IEEE Energy Conversion Congress & Exposition, September 20-24, 2015, Montreal, QC, Canada.
- [20] FAN H, LI H. High-frequency transformer isolated bidirectional DC-DC converter modules with high efficiency over wide load range for 20 kVA solid-state transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(12): 3599-3608.
- [21] FERREIRA J A. The multilevel modular DC converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(10): 4460-4465.
- [22] KISH G J. On the emerging class of non-isolated modular multilevel DC-DC converters for DC and hybrid AC-DC systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1762-1771.
- [23] DU S, WU B, TIAN K, et al. A novel medium-voltage modular multilevel DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(12): 7939-7949.
- [24] KISH G J, LEHN P W. Modeling techniques for dynamic and steady-state analysis of modular multilevel DC/DC converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(6): 2502-2510.
- [25] SAAD H, PERALTA J, DENNETIERE 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.
- [26] DU S, WU B, ZARGARI N R. A transformerless high-voltage DC-DC converter for DC grid interconnection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(1): 282-290.
- [27] 粟时平, 魏新伟, 牛鼎, 等. 模块化多电平换流器电容电压改进排序平衡方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3874-3882.
SU Shiping, WEI Xinwei, NIU Ding, et al. A modified-sorting balancing method of capacitor voltage for modular multilevel converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3874-3882.
- [28] 张婕, 曾国辉, 赵晋斌, 等. 基于改进冒泡排序的模块化多电平换流器电容电压均衡策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 92-99.
ZHANG Jie, ZENG Guohui, ZHAO Jinbin, et al. Modular multilevel converter capacitor voltage balancing strategy based on improved bubble sorting[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 92-99.
- [29] 陆羿, 李继红, 裘鹏, 等. 基于电容电压波动的模块化多电平换流器电容电压均衡策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 158-164.
LU Yi, LI Jihong, QIU Peng, et al. Capacitor voltage balancing algorithm for modular multilevel converters based on voltage fluctuation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 158-164.

收稿日期: 2021-01-29; 修回日期: 2021-04-07

作者简介:

马文忠(1968—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为柔性直流输电, 能源互联网和模块化多电平变换器; E-mail: mawenzhong@126.com

田洪英(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高压大功率 DC/DC 变换器. E-mail: 771404195@qq.com

(编辑 周金梅)