

基于 Hexverter 的 AC/AC 系统交流不对称故障控制策略研究

张翀, 张嘉楠, 张迪, 刘盼盼

(先进输电技术国家重点实验室(国网智能电网研究院有限公司), 北京 102200)

摘要: 六边形模块化多电平换流器(hexagonal modular multilevel converter, Hexverter)作为一种新型的 AC/AC 功率变换器,在未来海上风电场并网及低频输电技术中有着广阔的应用前景。为了解决 Hexverter 在电力系统不对称故障工况的稳定运行,文章首先对 Hexverter 的拓扑结构和工作原理简要介绍,并对其支路电流、支路功率进行分析。然后,研究其 AC/AC 系统交流侧不对称故障工况下的控制策略,基于理论推导部分得出的 Hexverter 六个支路间功率分布的规律(即不相邻的三个支路功率分别相等的特征),设计了子模块电容电压均衡控制方法,共包含两部分控制,分别为六个支路间子模块电容电压均衡控制和每个支路内部 n 个子模块电容电压之间的均衡控制。考虑到支路电流含有两侧交流系统不同频率成分,基于比例谐振控制器,提出了一种对支路电流直接进行控制的方法。最后,通过算例中稳态工况与故障工况研究分别对其工作原理和文中所提出的控制策略有效性进行验证。结果表明,在二次侧交流系统发生 BC 相短路故障期间,整个系统保持稳定运行,各个子模块电压始终保持均衡,仿真结果验证了文中所提控制策略的有效性。

关键词: 交流不对称故障; 比例谐振; 模块化多电平换流器; 环流; 子模块电压均衡

Research on AC Asymmetrical Fault Control Strategy AC/AC System Based on Hexverter

ZHANG Chong, ZHANG Jianan, ZHANG Di, LIU Panpan

(State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology (State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd.), Beijing 102200, China)

Abstract: Hexagonal modular multilevel converter, as a new type of AC/AC power converter, has broad application prospects in grid connection of offshore wind farms in the future and low-frequency transmission technology. For achieving the stable operation of the Hexverter in asymmetrical condition of the power system, the topological structure and working principle of the Hexverter are simply introduced at first in this paper, and its branch current and branch power are analyzed. Then, the control strategy of the AC side of AC/AC system under the asymmetrical condition is studied, the power distribution among six branches of Hexverter is obtained on the basis of theoretical derivation (i.e., feature of equal power of three branches that are not adjacent), the method of sub-module voltage balancing control, consisting of capacitive voltage balancing control among six sub-modules and the balancing control among capacitive voltage of n pieces of sub-modules, is designed. Considering that the branch currents contain different frequency components of AC systems on both sides, a branch current control method based on proportional resonance controller is proposed. Finally, its working principle and the effectiveness of the control strategy proposed in this paper are verified at the steady and faulty condition of the example. The results show that in case of short circuit fault of phase B and C at the AC system of the secondary side, the whole system maintains stable operation, the voltage of each sub-module always remains balanced and the effectiveness of the control strategy proposed in this paper is verified by the simulation result.

Keywords: AC asymmetrical fault; proportional resonance; modular multilevel converter; loop current; sub-module voltage equalization

收稿日期: 2023-10-27

基金项目: 国家电网公司科技项目(高比例分布式电源接入下的县域数字化低压电网关键技术研究, 5400-202122573A-0-5-SF)。

0 引言

我国沿海地区海上风能资源富饶,大力开展海上风电并网技术研究是构建新型电力系统,进而实现“双碳”目标的重要举措之一。目前,海上风电的并网方式主要有3种^[1-2],分别为高压交流输电、分频输电(fractional frequency transmission system, FFTS)和高压直流输电。虽然常规高压交流输电结构相对简单、技术相对较为成熟,但因受长距离电缆的充电电流和充电功率影响,主要适用于近海、小容量风电的并网应用场景^[3-4]。分频输电技术采用低于工频的传输频率(如50/3 Hz)进行电能输送,可以在一定程度上削弱对实际工程中电缆载流量的约束,增加了海上风电并网的输送距离。如今,随着我国首个即将投运的柔性低频输电示范工程—“浙江台州35kV柔性低频输电示范工程”的投入运行,其可靠性将会进一步得到验证。

换流器作为风电并网的关键设备之一,在能量传输和频率变换方面起到了至关重要的作用^[5-9]。除了通过背靠背结构柔性直流技术可以实现两个不同频率的交流系统互联之外,模块化多电平直接AC/AC型换流器逐渐受到关注^[10-11]。作为模块化多电平矩阵结构换流器的其中一种简化衍生结构—六边形模块化多电平换流器由6个H桥子模块及其电感串联的支路组成^[12]。相关文献研究结果表明较低的电压纹波将使得Hexverter在低频输电技术应用领域更具优势^[13]。

截至目前,关于Hexverter拓扑的相关研究主要集中在对其基本工作原理,特别是其支路能量控制方法研究方面^[14-22]。文献[23]针对Hexverter的损耗特性进行研究,从数学理论上分析推导了各个器件的通态损耗和开关损耗,研究了不同工况下子模块的损耗分布特性。文献[24]提出通过分频输电技术将其应用于海上风电场并网,文中设计了系统稳态运行控制策略,但并未涉及故障等暂态分析。

实际的电网会因短路等突发性故障使之处于不对称的运行状态,在非正常工况下系统中电压、电流等电气量将会分离出负序分量,这些量的存在不仅会增加电流的有效值,同时也会在两侧系统产生大量的非特征谐波。由此造成的负面效果主要包括两方面:一方面可能会导致系统出现过流现象;另一方面,谐波的产生轻者会影响控制器调节的效果,使实际控制效果不理想,严重情况会导致换流器中的IGBT等器件出现过电压/过电流。无论上述哪种情况都会对整个系统的安全稳定运行带来潜在的危害,因此,本文研究Hexverter在交流系统不对称工况下的控制策略

具有较大的应用价值。本文首先对Hexverter拓扑结构和工作原理及其支路电流、功率等进行理论分析和仿真验证。然后,基于理论推导部分得出的6个支路间功率分布特征,分别设计了支路间和支路内子模块电容电压均衡控制方法。通过环流控制实现各支路间的电容电压均衡;通过调整子模块的输出电压,重新分配支路内各个子模块的功率,实现支路内子模块电容电压均衡控制。基于理论分析,考虑到支路电流含有两侧交流系统不同频率成分,提出了一种基于比例谐振控制器的支路电流控制方法,直接对支路电流进行控制。最后,通过算例对该控制策略在不对称故障工况下的控制效果进行了仿真验证。

1 Hexverter拓扑结构及工作原理分析

图1为本文所研究的Hexverter拓扑结构,由6个相同的支路组合形成六边形的环状结构。两侧交流系统的三相(图中一次侧标记 U, V, W 和二次侧标记 R, S, T)分别交替地相互连接。一侧系统的每一相(如 R 相)通过两个不同支路(A和F)与另一侧系统的两相(V 和 W)相连接。

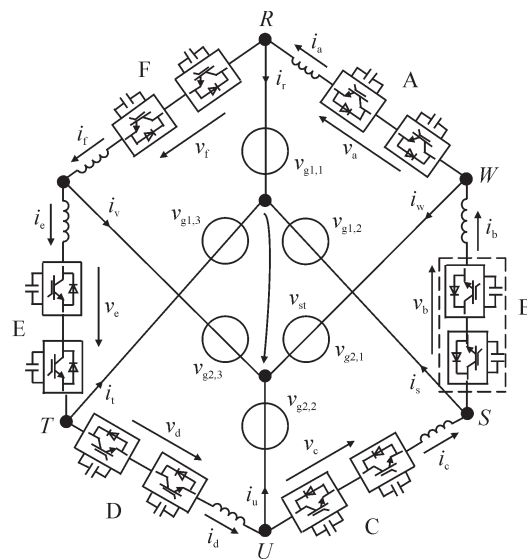


图1 六边形模块化多电平换流器(Hexverter)拓扑结构图
Fig. 1 Topological diagram of Hexverter

假设换流器两侧三相系统电压和电流分别为

$$\begin{aligned} v_r &= \sqrt{2} V_1 \sin \omega_1 t \\ v_s &= \sqrt{2} V_1 \sin(\omega_1 t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_t &= \sqrt{2} V_1 \sin(\omega_1 t - \frac{4\pi}{3}) \\ i_r &= \sqrt{2} I_1 \sin(\omega_1 t - \phi_1) \\ i_s &= \sqrt{2} I_1 \sin(\omega_1 t - \frac{2\pi}{3} - \phi_1) \\ i_t &= \sqrt{2} I_1 \sin(\omega_1 t - \frac{4\pi}{3} - \phi_1) \end{aligned} \quad (1)$$

2.1 Hexverter子模块电压均衡控制方法

本文中定义6个支路间的电容电压平均值 $\bar{v}_{XY}(X, Y=A, \dots, F)$ 和每个支路内的电容电压平均值 $\bar{v}_i(i=1, \dots, n)$ 分别如下所示:

$$\begin{aligned}\bar{v} &= \frac{1}{6}(\bar{v}_A + \bar{v}_B + \dots + \bar{v}_F) \\ \bar{v}_i &= \frac{1}{n}(v_{i1} + v_{i2} + \dots + v_{in}), (i=A, \dots, F) \\ \bar{v}_{AB} &= \frac{1}{2}(\bar{v}_A + \bar{v}_B) \\ \bar{v}_{CD} &= \frac{1}{2}(\bar{v}_C + \bar{v}_D) \\ \bar{v}_{EF} &= \frac{1}{2}(\bar{v}_E + \bar{v}_F) \\ \bar{v}_{DE} &= \frac{1}{2}(\bar{v}_D + \bar{v}_E) \\ \bar{v}_{FA} &= \frac{1}{2}(\bar{v}_F + \bar{v}_A) \\ \bar{v}_{BC} &= \frac{1}{2}(\bar{v}_B + \bar{v}_C)\end{aligned}\quad (7)$$

2.1.1 支路间子模块电容电压均衡控制

通过施加环流控制实现各支路间的子模块电容电压均衡控制。环流分别由频率 ω_1 和 ω_2 两种分量构成,基于前文中式(6)所得6个支路间功率分配规律,环流参考值由式(8)给出,式中 k_{p1} 和 k_{i1} 分别为比例和积分系数。

$$\begin{aligned}i_{11}^* &= (k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s})(\bar{v} - \bar{v}_{AB})\sin\omega_1 t + \\ & (k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s})(\bar{v} - \bar{v}_{CD})\sin(\omega_1 t - \frac{2\pi}{3}) + \\ & (k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s})(\bar{v} - \bar{v}_{EF})\sin(\omega_1 t + \frac{2\pi}{3}) \\ i_{12}^* &= (k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s})(\bar{v} - \bar{v}_{DE})\sin\omega_2 t + \\ & (k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s})(\bar{v} - \bar{v}_{FA})\sin(\omega_2 t - \frac{2\pi}{3}) + \\ & (k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s})(\bar{v} - \bar{v}_{BC})\sin(\omega_2 t + \frac{2\pi}{3})\end{aligned}\quad (8)$$

2.1.2 支路内子模块电容电压均衡控制

通过调整支路内单个子模块的输出电压,可以对支路内各个子模块的功率重新进行分配。因此,为了实现支路内单个子模块电容电压均衡控制,通过在子模块的调制信号中叠加一个分量来微调各子模块的最终输出电压。

$$v_{xn}^* = k_{p2}(\bar{v}_i - v_{xn})i_x \quad (9)$$

上式中, $\bar{v}_i$ 为(7)式中定义的6个支路电容电压代数平均值, $v_{xn}(X=A, \dots, F, n=1, \dots, N)$ 表示 $X(X=A, \dots, F)$ 支路中的第 n 个子模块的电容电压值。下式(10)所示,将该参考值在一个支路内进行求和,总和为零表明支路内单个电容电压均衡控制

并不会影响支路电流控制和支路间的电容电压均衡控制。

$$\sum_{n=1}^N v_{xn}^* = 0 \quad (10)$$

2.2 支路电流控制

如前文中式(4)所描述,每个支路电流都包含不同频率,因此常规的 P/Q 变换很难实现对其电流控制。而基于内模原理^[25],本文采用下式所示的控制器直接对支路电流进行控制。

$$v_x^* = \left[k_{p3} + k_{s3} \frac{C(s)}{M(s)} \right] (i_x^* - i_x) \quad (11)$$

若取 $M(s) = s^2 + \omega_0^2$ 时,则为典型的PR控制器,因此,采用下式所示控制器结构。

$$v_x^* = \left[k_{p3} + k_{s3} \left(\frac{\omega_1^2 s}{s^2 + \omega_1^2} + \frac{\omega_2^2 s}{s^2 + \omega_2^2} \right) \right] (i_x^* - i_x) \quad (12)$$

式中: ω_1 和 ω_2 分别为一次侧和二次侧系统频率; k_{p3} 和 k_{s3} 为常数。

3 算例分析

为了验证Hexverter的基本工作原理和本文所提出的交流系统不对称故障工况下控制策略的有效性,基于PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真平台搭建图1所示系统模型分别开展稳态工况和故障暂态工况仿真验证,系统参数如表1中所示。本文主要研究Hexverter在低频输电系统中的应用,因此两侧系统频率分别取为50 Hz和50/3 Hz用于模拟低频输电,采用载波移相PWM调制策略。

表1 电路参数列表
Table 1 List of circuit parameters

参数	数值
一次侧电压 $V_1(L-L)/kV$	10
二次侧电压 $V_2(L-L)/kV$	10
电容额定电压 V_c^*/kV	0.9
电容 $C/\mu F$	8 400
一次侧系统频率 f_1/Hz	50/3
二次侧系统频率 f_2/Hz	50
支路电感 L/mH	5

由文献[23]中分析可知最大支路电压为 $v_{br,max} = \hat{v}_{g1} + \hat{v}_{g2} + v_{st}$,其中 $\hat{v}_{g1}$ 、 $\hat{v}_{g2}$ 表示一次侧和二次侧系统的电压幅值。因此,仿真系统中每个支路所包含的最小子模块数 n 需要满足

$$n \geq \frac{v_{br,max}}{v_{cN}} = \frac{\hat{v}_{g1} + \hat{v}_{g2} + v_{st}}{v_{cN}} \quad (13)$$

式中 v_{cN} 为子模块电容电压额定值。

基于上述分析,仿真中每个支路子模块数 n 取

20. 通过载波移相调制 PWM 方式生成 IGBT 触发脉冲。

3.1 稳态工况分析

图 3 为线电压波形图,图 4 和图 5 中为两侧系统的稳态电流波形,与参数列表中一致,两侧系统的电流频率分别为 50/3 Hz 和 50 Hz,用于模拟低频输电系统。图 6 为支路 A 电流波形图,图 7 为支路模块图,图 6 和图 7 所示结果与原理分析相一致,支路电压和支路电流都包含两侧系统的不同频率含量。图 7 中所示多电平电压为 n 个模块生成电压(图 1 中标注虚线处及 A、B、C、D、E、F),如前文所述,由于每个支路由 n 个子模块级联构成,电压中的电平数目为 $2n+1$ 。图 8 所示为支路内 n 个子模块电容电压波形,所有电容的电压维持在额定值,并伴有轻微波动。

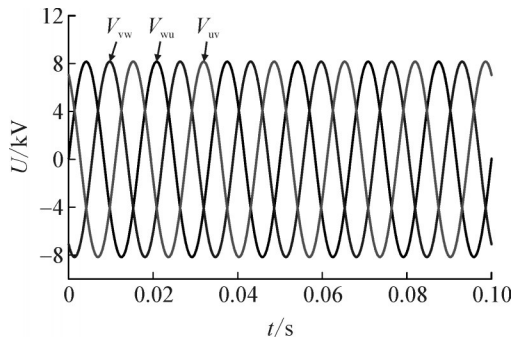


图 3 线电压波形
Fig. 3 Line voltage waveform

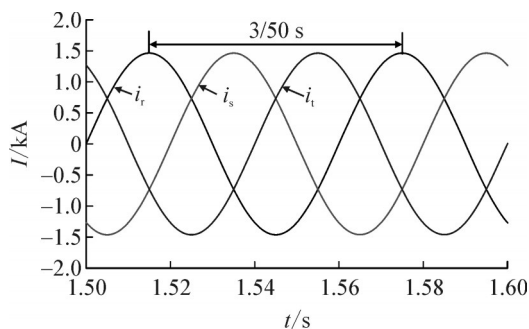


图 4 低频侧系统电流 i_r, i_s, i_t
Fig. 4 System currents i_r, i_s, i_t at low frequency side

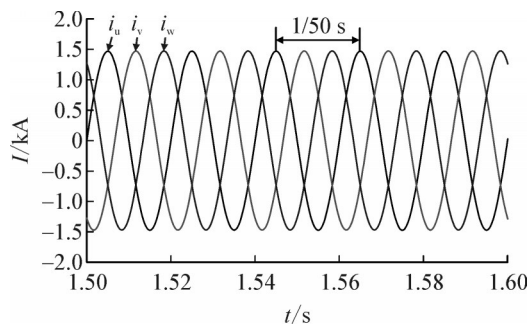


图 5 工频侧系统电流 i_u, i_v, i_w
Fig. 5 System currents i_u, i_v, i_w at power frequency side

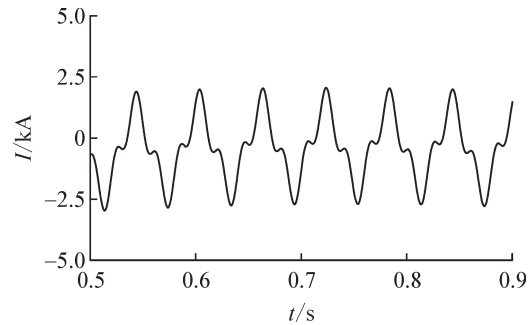


图 6 支路 A 电流波形
Fig. 6 Current waveform of branch-A

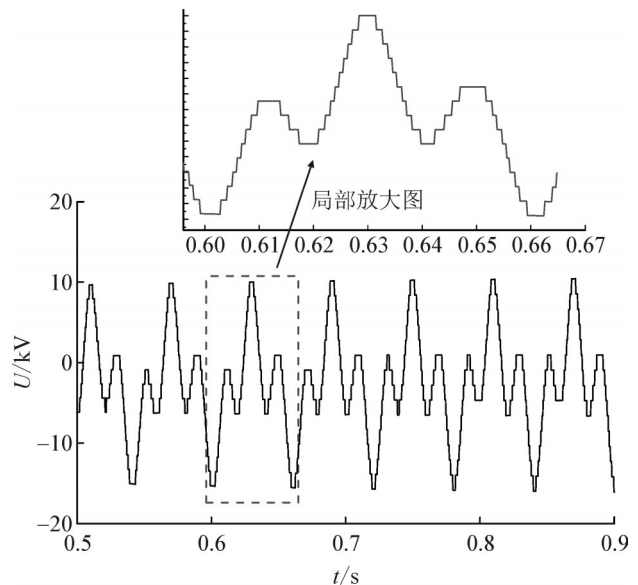


图 7 支路模块(图 1 中标注“A”)电压
Fig. 7 Branch module voltage (as depicted "A" in Fig.1)

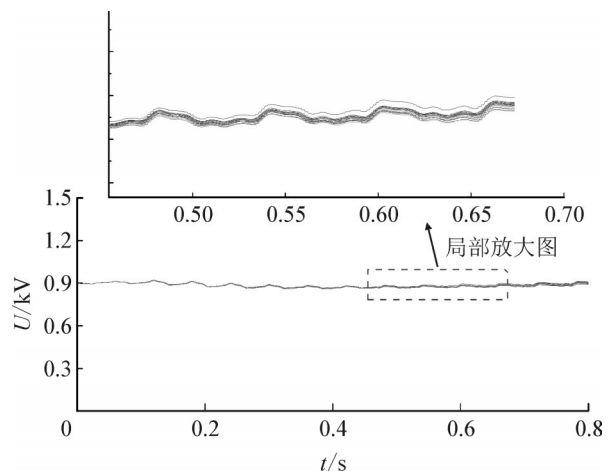


图 8 子模块电压
Fig. 8 Voltages of sub-modules

3.2 故障工况分析

在故障工况下两侧系统有功功率指令的变化如表 2 所示,控制参数如表 3 所示,文中为了实现系统单位功率因数运行,将两侧无功功率指令 Q_1 和 Q_2 分别置为零。 $t=1$ s 时刻二次侧交流系统施加 BC 两相短路故障,故障持续时间为 0.5 s。

表2 系统有功功率设定值		
Table 2 Active power settings of system		
t/s	P_1 /MW	P_2 /MW
0~0.5	0	0
0.5~1.0	8	-8
1.0~1.5	4	-4
1.5~3.0	8	-8

表3 控制器参数值	
Table 3 Parameters of controller	
参数	数值
k_{p1}	1.5
k_{i1}	1.2
K_{p2}	0.1
K_{p3}	40.0
k_{i3}	1 200.0

图9和图10为整个仿真过程中两侧系统的三相电压波形。从图中可以看出,二次侧系统发生BC两相不对称短路故障后,一次侧系统电压始终保持其额定值,故障的施加与否对其影响不大。

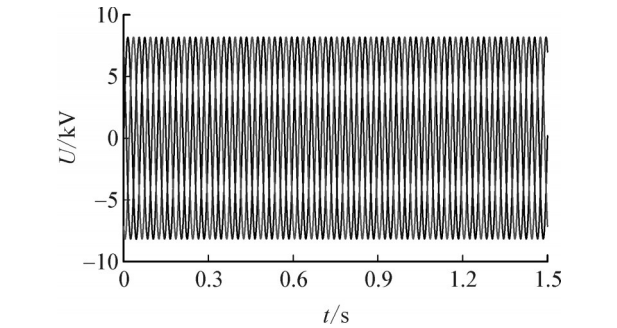


图9 低频侧三相交流电压波形
Fig. 9 Three-phase AC voltage waveform at low frequency side

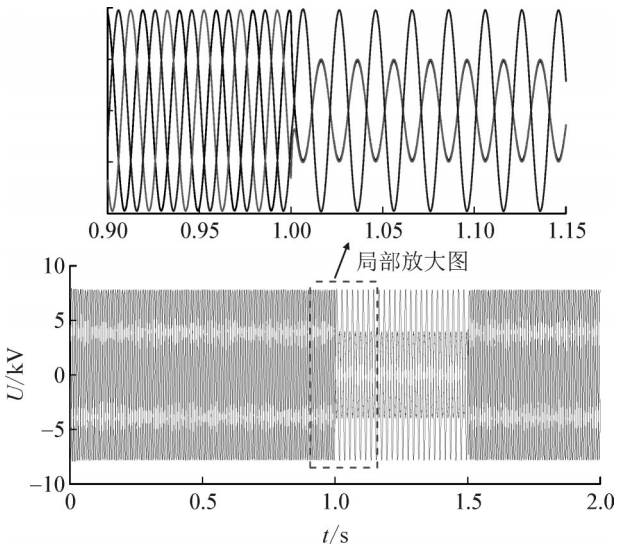


图10 工频侧三相交流电压波形
Fig. 10 Three-phase AC voltage waveform at power frequency side

图11为低频侧三相交流电流波形图,图12为工频侧三相交流电流波形,图13为系统有功功率和无功功率图。

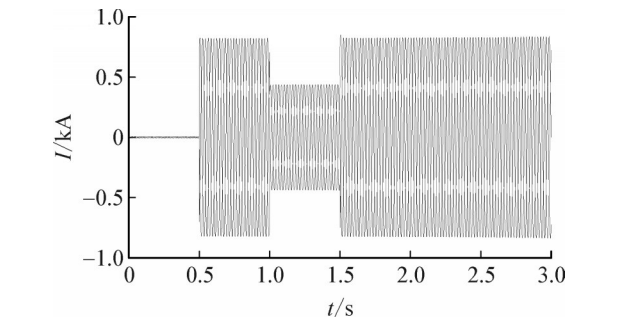


图11 低频侧三相交流电流波形
Fig. 11 Three-phase AC current waveform at low frequency side

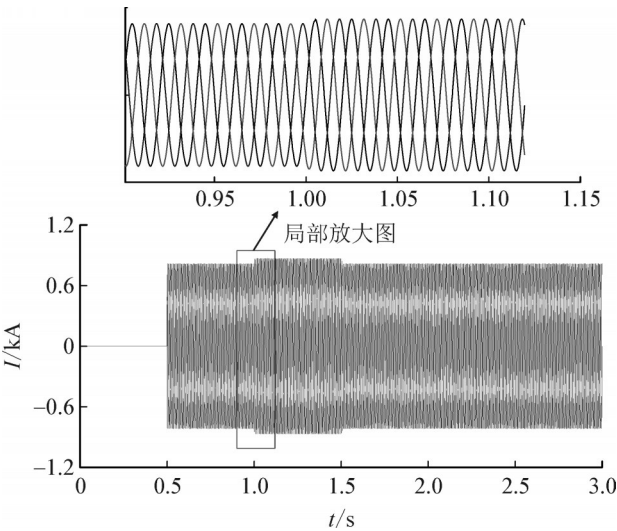


图12 工频侧三相交流电流波形
Fig. 12 Three-phase AC current waveform at power frequency side

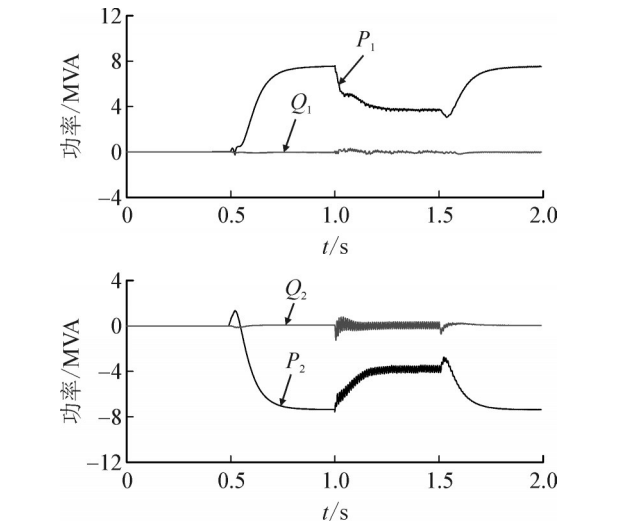


图13 系统有功功率和无功功率
Fig. 13 Active power and reactive power of system

如图11所示,在1.0~1.5 s时刻故障施加期间,一次侧由于其系统电压不变(图9所示)而其有功

功率设定值的减小,使得系统的电流减小;在 1.5 s 时刻故障清除后,随着有功功率设定值的改变,两侧系统的电流又逐渐恢复到初始值。图 13 为两侧系统功率变化情况。很显然,有功功率 P 和无功功率 Q 能够迅速跟踪其各自的设定值,一次侧系统的有功/无功功率不存在二倍频振荡,而二次侧系统的功率在故障期间出现二倍频振荡现象。支路内子模块电容电压波动情况如图 14 所示,可以看到故障施加和清除瞬间子模块电容电压有所增加,其余时段内仍然保持均衡且稳定在额定值附近。该现象证明了前文所提出的子模块电容电压均衡控制的有效性。

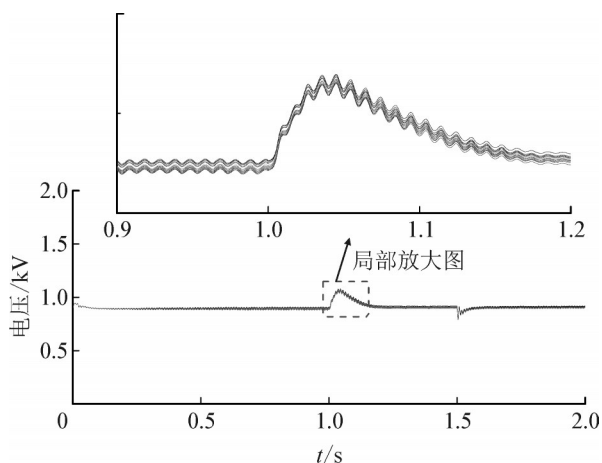


图 14 子模块电压波形
Fig. 14 Voltage waveform of sub-modules

综合上述各个波形及其分析结果可知,在二次侧交流系统施加不对称故障的工况下,整个系统在故障期间仍能保持稳定运行,有效的证实了本文所提出控制策略的可行性。

4 结语

开展六边形模块化多电平换流器在交流系统不对称故障工况下的控制策略研究对其在未来实际工程应用中有着重要意义。本文通过环流控制实现各支路间的电容电压均衡;通过在子模块的输出电压上叠加额外增量,实现支路内子模块电容电压均衡控制。另外,考虑到支路电流含有不同频率成分,常规的交叉解耦控制策略难以实现精准控制,因此,提出了一种基于比例谐振控制器的支路电流控制方法,从而实现对支路电流的直接控制。最后,通过仿真算例对该控制策略的有效性进行了验证。

参考文献

[1] 蔡晖,张文嘉,彭竹羿,等. 基于大规模风电机组的虚拟惯量控制技术对江苏电网频率稳定性的影响研究[J]. 电

力电容器与无功补偿,2021,42(4):41-46.

- CAI Hui, ZHANG Wenjia, PENG Zhuyi, et al. Influence of large scale wind turbine-based virtual inertia control technology on frequency stability of Jiangsu power grid[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(4): 41-46.
- [2] 罗红梅,申旭辉,董立,等. 采用交流海缆接入的海上风电场无功配置方法[J]. 电力电容器与无功补偿,2021,42(6):1-10.
- LUO Hongmei, SHEN Xuhui, DONG Li, et al. Reactive power configuration method of offshore wind power with access of AC submarine cable[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(6): 1-10.
- [3] LI Rui, YU Lujie, XU Lie, et al. Coordinated control of parallel DR-HVDC and MMC-HVDC systems for offshore wind energy transmission[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(3): 2572-2582.
- [4] 朱乾龙,齐盟. 风电场等值模型准确度评价研究综述[J]. 电力电容器与无功补偿,2020,41(6):180-184.
- ZHU Qianlong, QI Meng. Review on accuracy evaluation of equivalent model of wind farm[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(6): 180-184.
- [5] 刘卫东,李奇南,王轩,等. 大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望[J]. 中国电力,2020,53(7):55-71.
- LIU Weidong, LI Qinan, WANG Xuan, et al. Application status and prospect of VSC-HVDC technology for large-scale offshore wind farms[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 55-71.
- [6] 蒋冠前,李志勇,杨慧霞,等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(15):145-153.
- JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.
- [7] 唐庚,徐政,薛英林,等. 基于模块化多电平换流器的多端柔性直流输电控制系统设计[J]. 高电压技术,2013,39(11):2773-2782.
- TANG Geng, XU Zheng, XUE Yinglin, et al. Control design of multi-terminal HVDC based on modular multilevel converter[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(11): 2773-2782.
- [8] 汤广福,贺之渊,庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化,2013,37(15):3-14.
- TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of flexible DC transmission engineering technology[J]. Automation of Electric Power Sys-

- tems, 2013, 37(15): 3-14.
- [9] 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.
- TANG Guangfu, HE Zhiyuan, TENG Letian, et al. New progress on HVDC technology based on voltage source converter[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 39-44, 89.
- [10] ERICKSON R. W., AL-NASEEM O. A. A new family of matrix converters[C]// 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Denver, CO, USA, 2001: 1515-1520.
- [11] OATES C. A methodology for developing 'Chainlink' converters[C]// 13th European Conference on Power Electronics and Applications. [S. l.]: IEEE, 2009: 1-10.
- [12] 刘健. 模块化多电平矩阵变换器的控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [13] BARUSCHLA L, A. MERTERN, A new 3-phase AC/AC modular multilevel converter with six branches in hexagonal configuration[C]// 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Phoenix, AZ, USA: IEEE, 2011: 4005-4012.
- [14] KARWATZKI D, BARUSCHKA L, VON M, et al. Branch energy control for the modular multilevel direct converter Hexverter[C]// 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 2014: 1613-1622.
- [15] D KARWA L B V H, A. MERTENS, Optimized operation mode for the Hexverter topology based on adjacent compensating power[C]// 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 2014: 5399-5406.
- [16] TSURUTA R, HOSAKA T, FUJITA H. A new power flow controller using six multilevel cascaded converters for distribution systems[C]// 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 2014: 1350-1356.
- [17] PEREDA J, GREEN T C. Direct modular multilevel converter with six branches for flexible distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4): 1728-1737.
- [18] BARUSCH L, KARWATZKI D, VON H M, et al. Low-speed drive operation of the modular multilevel converter Hexverter down to zero frequency[C]// 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 2014: 5407-5414.
- [19] KORN A J, WINKELNKE M, STEIMER P, et al. Direct modular multi-level converter for gearless low-speed drives[C]// 14th European Conference on Power Electronics and Applications. Birmingham, UK: IEEE, 2011: 1-7.
- [20] KORN A J, WINKELNKE M, STEIMER P. Low output frequency operation of the modular multi-level converter[C]// IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Atlanta, GA, USA: IEEE, 2010: 3993-3997.
- [21] 王盼, 刘飞, 查晓明, 等. 双电机异步驱动的三端口级联多电平变换器及再生能量分配系统[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1799-1809.
- WANG Pan, LIU Fei, ZHA Xiaoming, et al. Tri-port cascaded multilevel converter system for two-motor asynchronous drive and its regenerative energy distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1799-1809.
- [22] WANG Pan, LIU Fei, ZHA Xiaoming, et al. A regenerative hexagonal - cascaded multilevel converter for two - motor asynchronous drive[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(4): 1687-1699.
- [23] 张翀, 李宽宏, 张轩, 等. 六角形模块化多电平AC/AC换流器损耗特性分析计算[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(13): 105-113.
- ZHANG Chong, LI Kuanhong, ZHANG Xuan, et al. Analysis and calculation of loss characteristics for hexagonal modular multilevel AC/AC converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(13): 105-113.
- [24] MENG Yongqing, LIU Bo, LUO Huiyong, et al. Control scheme of hexagonal modular multilevel direct converter for offshore wind power integration via fractional frequency transmission system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(1): 168-180.
- [25] JIE Huang. Nonlinear output regulation: theory and applications[M]. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2004.
- 作者简介:**
- 张翀(1988—), 男, 博士, 从事模块化多电平换流器技术研究工作。E-mail: 1282770959@qq.com。
- 张嘉楠(1997—), 女, 硕士, 从事海上风电并网技术研究工作。
- 张迪(1990—), 男, 硕士, 从事柔性直流输电技术研究工作。
- 刘盼盼(1989—), 女, 硕士, 从事电力电子在电力系统中应用研究工作。