

# 海上风电柔性直流送出换流站 MMC 换流阀损耗研究

李浩原, 彭开军, 王江天, 刘超, 李文津, 周思远, 周国梁

(中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

**摘要:**海上风电柔性直流送出是目前柔性直流输电领域的研究热点, 损耗是柔性直流换流站的一个重要技术指标, 关系着柔性直流系统的输电效率和换流阀的设计。针对输电容量为 1000 MW 的海上风电柔性直流送出换流站 MMC 换流阀损耗特性, 研究了换流阀损耗的计算方法和关键计算参数的获取方法, 计算得到了换流阀损耗的组成和  $\pm 320$  kV/1000 MW 海上风电柔性直流送出工程送/受端换流站换流阀的损耗率。同时, 研究了联接变压器阀侧三次谐波注入、换流器调制比和直流极线电压对换流阀损耗率的影响, 结果表明: 在联接变压器阀侧注入三次谐波和增大换流器调制比可减小换流阀损耗率; 在相同输送容量的前提下, 增大直流极线电压可减小换流阀损耗率。

**关键词:**海上风电; MMC 换流阀; 损耗

**中图分类号:** TM 721.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)05-0043-08

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20230507

## Study on Loss of MMC Converter Valve Applied in Converter Station of Offshore Wind Power VSC-HVDC Transmission

LI Haoyuan, PENG Kaijun, WANG Jiangtian, LIU Chao, LI Wenjin, ZHOU Siyuan, ZHOU Guoliang

(Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power

Engineering Consulting Group, Wuhan 430071, Hubei, China)

**Abstract:** At present, the VSC-HVDC transmission of offshore wind power is a research hotspot in the field of flexible DC transmission. Loss is an important technical index of VSC-HVDC converter station, which is related to the transmission efficiency of VSC-HVDC system and the design of converter valve. Therefore, a loss calculation study on MMC converter valve of VSC-HVDC converter station applied in offshore wind power transmission with a transmission capacity of 1000 MW is carried out. The calculation method of valve loss and the acquisition method of key calculation parameters are studied. The composition of valve loss and the loss rate of valve at the converter station at the sending/receiving end of  $\pm 320$  kV/1000 MW VSV-HVDC project applied in wind power transmission are calculated. The effects of third harmonic injection, converter modulation ratio and DC pole line voltage on the valve loss rate are studied. The results show that the valve loss rate can be reduced by injecting the third harmonic at transformer valve side and increasing the converter modulation ratio, and under the same transmission capacity, the valve loss rate can be reduced by increasing the DC pole line voltage.

**Key words:** offshore wind power; MMC converter valve; loss

## 0 引言

近年来,中国近海海上风电开发已趋饱和,海上风电开发逐步向大容量机组、远离海岸方向发展,成为中国风电产业发展新的增长点。随着风电场容量

**基金项目:**中国能源建设集团中国电力工程顾问集团有限公司科技项目(GSKJ2-D05-2021)

不断增大以及海上风电场离岸距离不断增加,柔性直流输电成为远海大容量风场电力送出的首选方案<sup>[1-5]</sup>。目前海上风电柔性直流送出在世界范围都得到了广泛的应用,在欧洲仅德国就有多个海上风电柔性直流送出工程已投入运行。中国首个海上风电柔性直流送出工程——“三峡新能源江苏如东海海上风电场柔性直流输电工程”已于2021年12月投

入运行。中国第二个海上风电柔性直流送出工程——“三峡阳江青州五、青州七海上风电场海缆集中送出工程”已在工程实施中,输电容量为 2000 MW,直流电压等级为 $\pm 500$  kV。

对于海上风电柔性直流送出工程而言,损耗率是送出系统的一个重要指标。一个 1000 MW 的风电场损耗减小 0.1%,则每年可多送出 8.76 GWh 的电能,可见降低损耗有着较为可观的经济效益。同时,对柔性直流系统损耗的准确计算,可为整个输电系统的传输效率评估提供依据。因此对柔性直流输电系统损耗的研究具有重要的工程实际意义,而柔性直流系统损耗中,模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)换流阀的损耗占主要部分,可为换流阀子模块开关器件的选择和换流阀散热设计提供参考<sup>[6-7]</sup>。在设计阶段,柔性直流系统损耗无法通过测量得到,因此需要研究一种方法对换流阀损耗和开关器件温度进行计算。

针对 MMC 换流阀损耗,国内外学者进行了一系列的研究工作。文献[8]采用分段解析公式的方法,给出了 MMC 子模块器件通态损耗和开关损耗的计算公式。文献[9]运用电路分析,给出了开关器件 IGBT 的并联模型,该模型为 MMC 换流阀损耗的近似估算提供了理论基础。文献[10]推导了开关器件的电流平均值和有效值计算方法,研究了开关器件的结温变化特点并给出了计算结温的方法。文献[11]给出了半桥子模块通态和开关损耗的计算方法,并基于其提出的换流阀子模块热模型,给出了 MMC 的可靠性分析和寿命评估的数据支撑。文献[12]采用数据拟合的方法得到了便于工程应用的 MMC 损耗计算公式,并针对厦门柔性直流输电工程计算结果进行了分析对比。文献[13]在调研电力电子设备损耗测量技术的基础上,提出了 MMC 换流阀功率模块损耗测量试验方法,为柔性直流工程中功率模块损耗测试提供了参考。文献[14]对 MMC 在正弦脉宽调制方式下子模块上下管开关器件的投入概率进行分析,推导了上下管开关器件等效电流的表达式,解析出上下管开关器件的平均电流和有效电流。文献[15]对比分析了采用 4500 V/1500 A 和 4500 V/3000 A 器件的情况下,4 种适用于 $\pm 500$  kV/3000 MW 柔性直流输电换流器的组合式 MMC 拓扑损耗特性。文献[16]在现有解析计算方法的基础上,进一步精确推导得到涵盖系统工况及

器件特性的损耗计算通用表达式。文献[17]针对控制环节中加入二次环流抑制和三倍频电压注入的半桥-全桥子模块混合型 MMC,对换流阀的损耗进行了分类并给出了计算方法。文献[18]提出了一种适用于多种子模块拓扑,能够准确计算不同均压策略、不同运行工况下的换流阀损耗的方法,尤其解决了排序算法下附加开关损耗计算困难的问题。文献[19]推导了叠加三次谐波后换流阀的损耗计算公式,详细分析了三次谐波叠加率对换流阀损耗的影响。

海上风电柔性直流送出已成为研究热点,但关于海上风电柔性直流输电系统 MMC 换流阀损耗的研究较少,且现有文献没有较为系统地分析换流阀损耗的影响因素和优化措施。因此,下面基于目前较为常见的输电容量为 1000 MW 的海上风电柔性直流送出工程及其主回路参数和常用的半桥子模块拓扑,研究了海上风电柔性直流送出工程换流阀损耗的计算方法和原理,计算了 MMC 换流阀损耗,并研究了 MMC 换流阀损耗影响因素,给出了减小损耗的优化建议。

## 1 海上风电柔性直流送出系统拓扑结构与参数

用于远距离大规模海上风电并网的柔性直流常用系统接线如图 1 所示。对于容量为 1000 MW 的海上风电柔性直流送出工程,一般均采用对称单极结构,直流极线电压多采用 $\pm 320$  kV。目前常用的海上风电柔性直流送出系统总体包含以下几个部分:海上风电场、海上升压站(若采用 66 kV 直接接入则无海上升压站)、海上换流站、直流海缆、陆上换流站、陆上交流系统。运行方式为:风电场电能汇集后,经海上升压站升压至 220 kV,由 220 kV 交流海缆送至海上柔性直流整流站;再通过高压直流海缆送至陆上柔性直流逆变站;最后,逆变为 500 kV 交流电接入陆上电网系统。

对于直流极线电压为 $\pm 320$  kV,输电容量为 1000 MW 的海上风电柔性直流输电系统,换流站主设备参数如表 1 所示。

## 2 MMC 换流阀损耗计算方法

关于 MMC 换流阀损耗计算,已有 IEC 标准予

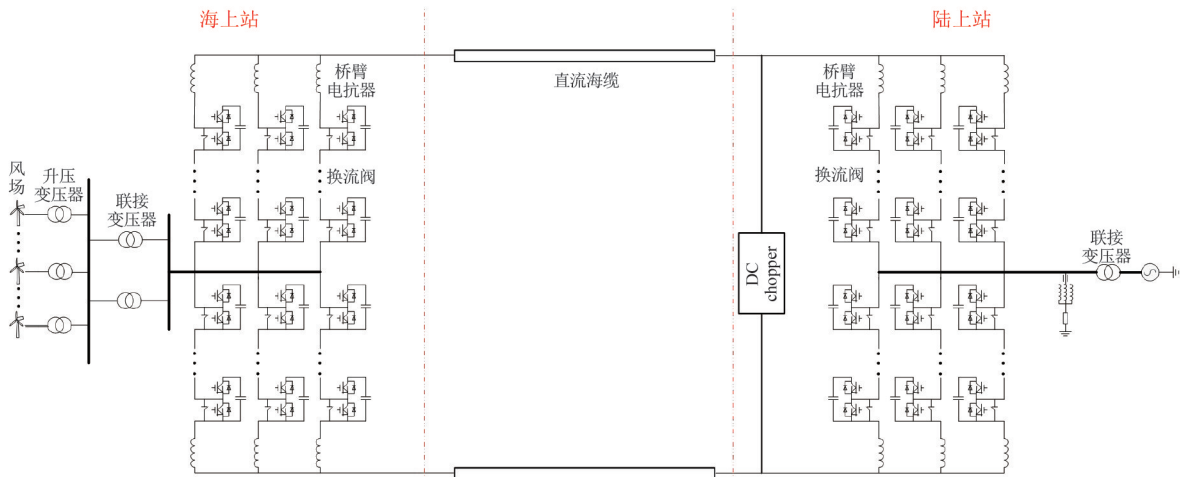


图 1 海上风电柔性直流输电系统拓扑

表 1 ±320 kV/1000 MW 换流站主设备参数

参数	数值
额定有功容量/MW	1000
额定无功容量/Mvar	300
额定直流电压/kV	±320
网侧额定电压/kV	525/230
阀侧额定电压/kV	333
每桥臂子模块数	305
子模块冗余度/%	8
桥臂电抗器电感/mH	100
子模块电容电压/kV	2.1
模块电容/mF	9

以规定,参考 IEC 62751-2:2014。MMC 换流阀总损耗包含 9 个部分,各部分损耗计算方法如下:

1) IGBT 导通损耗  $P_{V1}$

子模块中 IGBT 的通态损耗是其内部 T1 和 T2 两个 IGBT 通态损耗之和,如式(1)所示。

$$P_{V1} = \sum_{j=1}^{N_{ic}} (V_{OT} \cdot I_{T1av,j} + R_{OT} \cdot I_{T1rms,j}^2 + V_{OT} \cdot I_{T2av,j} + R_{OT} \cdot I_{T2rms,j}^2) \quad (1)$$

式中: $N_{ic}$ 为 MMC 换流阀子模块总数; $V_{OT}$ 为 IGBT 平均阈值电压; $R_{OT}$ 为 IGBT 平均斜率电阻; $I_{T1av,j}$ 为子模块  $j$  中的 T1 平均电流; $I_{T2av,j}$ 为子模块  $j$  中的 T2 平均电流; $I_{T1rms,j}$ 为子模块  $j$  中的 T1 电流有效值; $I_{T2rms,j}$ 为子模块  $j$  中的 T2 电流有效值。

从式(1)可以看出,影响 IGBT 导通损耗的两个重要器件参数是  $R_{OT}$  和  $V_{OT}$ ,可由 IGBT 的  $V_{CE}-I_C$  曲线计算而得,如图 2 所示。

2) 二极管导通损耗  $P_{V2}$

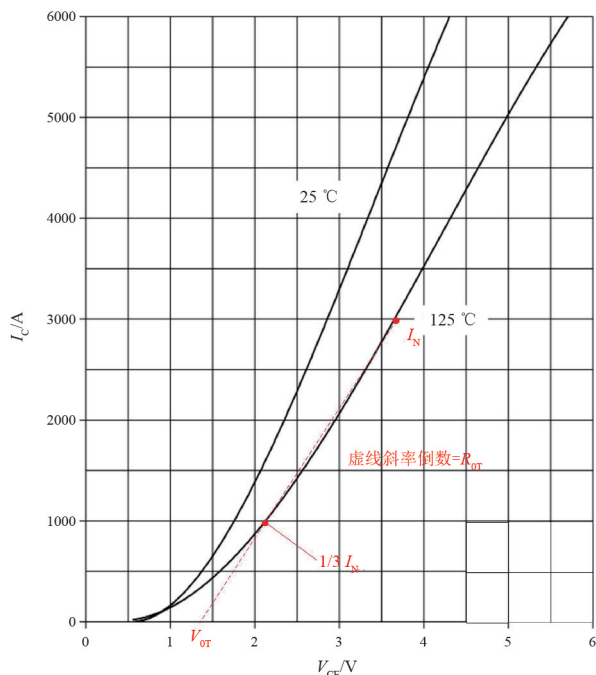


图 2  $V_{CE}-I_C$  典型关系曲线

反并联二极管 D1 和 D2 的导通损耗计算公式为

$$P_{V2} = \sum_{j=1}^{N_{ic}} (V_{OD} \cdot I_{D1av,j} + R_{OD} \cdot I_{D1rms,j}^2 + V_{OD} \cdot I_{D2av,j} + R_{OD} \cdot I_{D2rms,j}^2) \quad (2)$$

式中: $V_{OD}$ 为二极管平均阈值电压; $R_{OD}$ 为二极管平均斜率电阻; $I_{D1av,j}$ 为子模块  $j$  中的 D1 平均电流; $I_{D2av,j}$ 为子模块  $j$  中的 D2 平均电流; $I_{D1rms,j}$ 为子模块  $j$  中的 D1 电流有效值; $I_{D2rms,j}$ 为子模块  $j$  中的 D2 电流有效值。

与 IGBT 类似,二极管的损耗受  $R_{OD}$  和  $V_{OD}$  的影响,这两个参数可由器件的  $V_F-I_F$  曲线计算而得,计算方法与 IGBT 类似,如图 2 所示。

### 3) 其他导通损耗 $P_{V3}$

在 MMC 换流阀中,  $P_{V3}$  一般指连接铜排或导线等的电阻造成的损耗, 数值很小, 一般可以忽略不计。

### 4) 与直流电压相关的损耗 $P_{V4}$

对于 MMC 换流阀,  $P_{V4}$  一般为与子模块电容并联的均压电阻的损耗。

### 5) 直流电容损耗 $P_{V5}$

子模块内部的直流电容器的损耗由电容器内部金属化膜电极损耗、内部引线损耗和电介质损耗构成, 该部分损耗的等效电阻可由金属化膜电容器的等效串联电阻 (equivalent series resistance, ESR) 表示。

### 6) IGBT 开关损耗 $P_{V6}$ 和二极管理关断损耗 $P_{V7}$

开关损耗是器件导通和关断过程中的动态损耗。IGBT 导通和关断的过程也都是非理想的, 都分别有一个电压下降电流上升和电流上升电压下降的短暂重叠过程, 电压电流的乘积导致能量的损耗, 也就是 IGBT 的开关损耗。

IGBT 的开关总损耗为开通能量  $E_{on}$  和关断能量  $E_{off}$  之和, 如式(3)所示。

$$P_{V6} = \frac{1}{t_i} \times \sum_{j=1}^{N_{tc}} \sum_{k=1}^{N_s} (E_{on,T1,j,k} + E_{on,T2,j,k} + E_{off,T1,j,k} + E_{off,T2,j,k}) \quad (3)$$

式中:  $N_s$  为在积分时段  $t_i$  内每个 MMC 阀所经受的开关周期 (开通或关断) 次数;  $E_{on,T1,j,k}$  为子模块  $j$  中的 T1 在第  $k$  个开通事件中的开通能量损耗;  $E_{on,T2,j,k}$  为子模块  $j$  中的 T2 在第  $k$  个开通事件中的开通能量损耗;  $E_{off,T1,j,k}$  为子模块  $j$  中的 T1 在第  $k$  个关断事件中的关断能量损耗;  $E_{off,T2,j,k}$  为子模块  $j$  中的 T2 在第  $k$  个关断事件中的关断能量损耗;  $t_i$  为仿真中积分时间 (不小于 1 s)。

二极管的关断总损耗为阀中所有子模块中的 D1 和 D2 反向恢复能量  $E_{rec}$  的和, 积分时段为  $t_i$ , 如式(4)所示。

$$P_{V7} = \frac{1}{t_i} \times \sum_{j=1}^{N_{tc}} \sum_{k=1}^{N_s} (E_{rec,D1,j,k} + E_{rec,D2,j,k}) \quad (4)$$

式中:  $N_s$  为在积分时段  $t_i$  内每个 MMC 阀所经受的开关周期 (开通或关断) 次数;  $E_{rec,D1,j,k}$  为子模块  $j$  中的 D1 在第  $k$  个关断事件中的恢复能量损耗;  $E_{rec,D2,j,k}$  为子模块  $j$  中的 D2 在第  $k$  个关断事件中的恢复能量损耗。  $E_{on}$ 、 $E_{off}$  和  $E_{rec}$  的计算公式为

$$E_{on} = (a_1 + b_1 \cdot i_{on\_T} + c_1 \cdot i_{on\_T}^2) \frac{V_{SM}}{V_{CEN}} \cdot \rho_{Ton}$$

$$E_{off} = (a_2 + b_2 \cdot i_{off\_T} + c_2 \cdot i_{off\_T}^2) \frac{V_{SM}}{V_{CEN}} \cdot \rho_{Toff} \quad (5)$$

$$E_{rec} = (a_3 + b_3 \cdot i_{off\_D} + c_3 \cdot i_{off\_D}^2) \frac{V_{SM}}{V_{DN}} \cdot \rho_{Drec}$$

式中:  $V_{CEN}$ 、 $V_{DN}$  分别为 IGBT 和二极管的额定电压;  $V_{SM}$  为子模块电容电压;  $i_{on\_T}$ 、 $i_{off\_T}$  分别为 IGBT 开通和关断时刻的电流;  $i_{off\_D}$  为二极管关断时的电流;  $\rho_{Ton}$ 、 $\rho_{Toff}$ 、 $\rho_{Drec}$  为结温修正系数;  $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$ 、 $a_2$ 、 $b_2$ 、 $c_2$  可由 IGBT 器件开关能量特性曲线拟合得到;  $a_3$ 、 $b_3$ 、 $c_3$  可由二极管器件反向恢复能量特性曲线拟合得到。

图 3 为 4.5 kV/3 kA IGBT 开/关能量曲线。一般器件参数表会给出  $E_{on}-I_C$  曲线、 $E_{off}-I_C$  曲线, 但未给出  $E_{on}$  与集电极电流  $I_C$  的关系式及  $E_{off}$  与  $I_C$  的关系式。

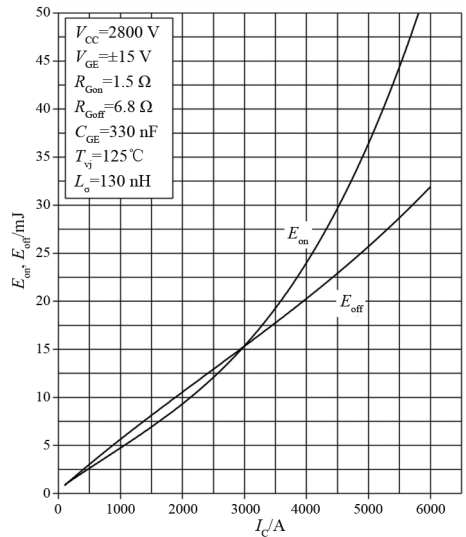


图 3 IGBT 开关能量函数曲线

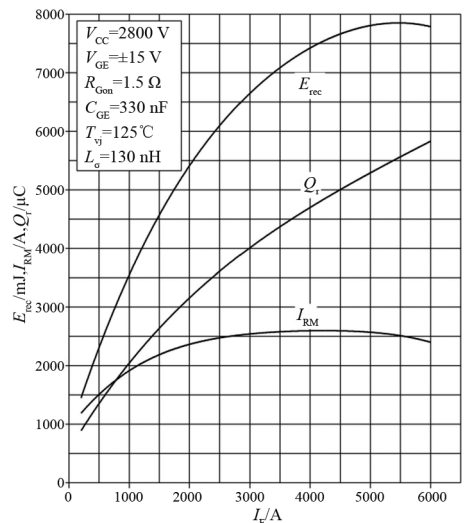
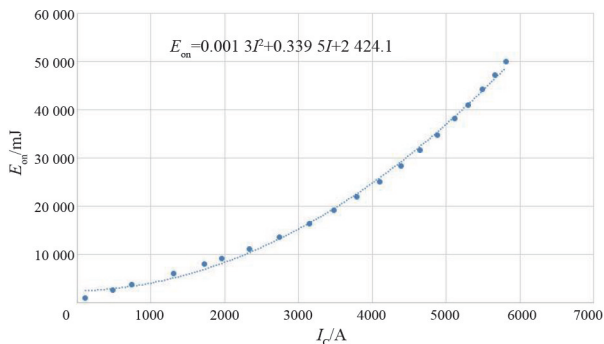


图 4 二极管反向恢复能量函数曲线

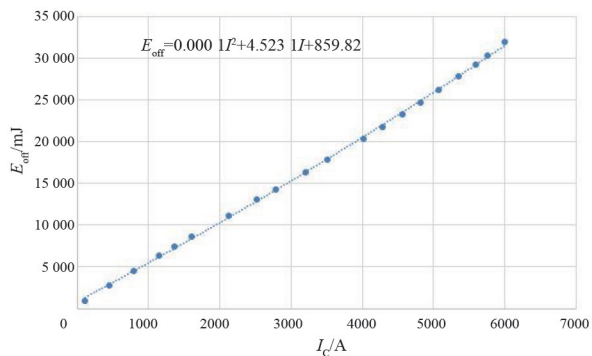
计算 IGBT 的开关损耗时, 需要利用曲线拟合得到参数  $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$  和  $a_2$ 、 $b_2$ 、 $c_2$ 。而二极管器件参数



表会给出关断能量与电流的关系曲线,如图 4 所示,故可以得到拟合系数  $a_3$ 、 $b_3$ 、 $c_3$ 。图 5 示例了对 IGBT 开通能量与关断能量拟合的结果;图 6 示例了对二极管关断能量拟合的结果。



(a) 开通能量曲线



(b) 关断能量曲线

图 5 IGBT 开关能量函数曲线拟合

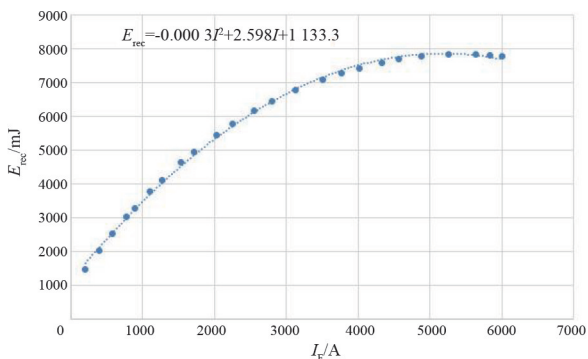


图 6 二极管反向恢复能量函数曲线拟合

7) 缓冲电路损耗  $P_{V8}$  和功率模块控制板卡损耗  $P_{V9}$

目前的 MMC 换流阀通常不含缓冲电路,因此该部分损耗  $P_{V8}$  可不计。

MMC 阀功率模块控制板卡损耗包括 IGBT 驱动及其相关辅助电路电源、监测装置、测量装置等。在 MMC 换流阀中,阀电子电路统一由取能电源供电,取能电源由直流电容供电,通过测量取能电源的输出功率就可以得到  $P_{V9}$ 。

8) 器件结温修正

为精确评估阀损耗,需要得到阀损耗计算时刻的 PN 结温度。图 7 给出的热路图可用于推算 PN 结的温度,它将 IGBT 和二极管的损耗等值为两个热源,而 PN 结与器件外壳之间的热传递过程则用热阻  $Z_{th}(JC\_T)$  和  $Z_{th}(JC\_D)$  表示。图中: $Z_{th}(JC\_T)$ 、 $Z_{th}(CS\_T)$  分别为 IGBT 器件、底板及散热器间的热阻,可查询器件参数表获得; $Z_{th}(JC\_D)$ 、 $Z_{th}(CS\_D)$  分别为二极管器件、底板及散热器间的热阻,可查询器件参数表获得; $T_S$  为散热器温度。

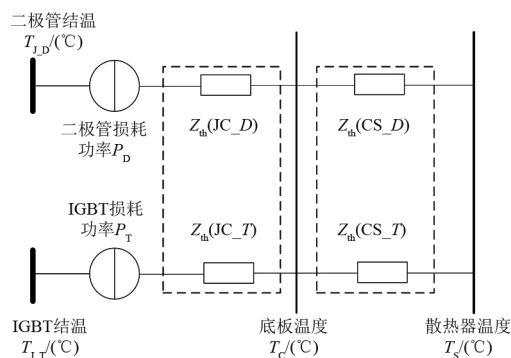


图 7 器件结温、底板和散热器间热路

由于开关器件工作温度与损耗功率存在耦合关系,因此需要采用迭代计算的方法获得。计算过程中,先给定开关器件初始结温  $T_{I,T}$ 、 $T_{I,D}$  (见图 7,初次计算设定值同底板温度),再根据图 8 步骤,得到修正温度替代初始温度,重复计算阀损耗直到两者相等,完成迭代过程确定损耗功率  $P_T$ 、 $P_D$  的终值,同时可得到开关器件的温度。

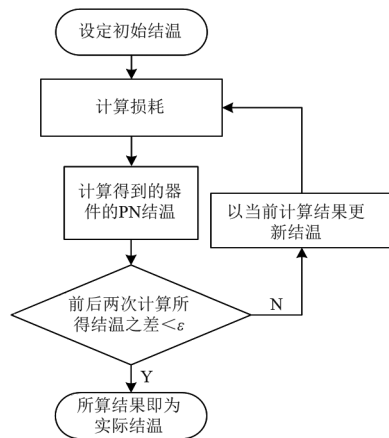


图 8 温度迭代流程

9) MMC 换流阀总损耗

通过上面各部分的损耗计算,最终可得到 MMC 换流阀的总损耗  $P_{MMC} = P_{V1} + P_{V2} + P_{V3} + P_{V4} + P_{V5} + P_{V6} + P_{V7} + P_{V8} + P_{V9}$ 。

### 3 MMC 换流阀损耗仿真计算

由于 MMC 换流阀的工作模式复杂,仅靠公式分析很难获得一些必要的输入参数,例如功率器件的电流和开关能量等,因此可采用仿真方法获得。仿真需要根据工程实际拓扑和主回路参数建立精确的电磁暂态仿真模型,控制策略也应与工程实际相符。

采用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件,根据表 1 的换流站参数和图 1 的拓扑结构建立较为精确的电磁暂态仿真模型。通过仿真计算获得功率器件任意时刻的电压、电流和开关状态,作为计算的重要输入参数;同时考虑功率器件的结温,选取实际结温对应的阈值电压、斜率电阻以及开关能量等开关器件参数,参照 IEC 62751-2 标准给出的公式计算得到 MMC 换流阀的损耗。

MMC 换流阀在稳态运行时,可认为各桥臂子模块的损耗特性相同。为了准确计算子模块损耗,需对子模块投入和切除过程中的开关状态有准确的掌握,对于半桥子模块,其工作状态不同引起的不同损耗分布有 4 种情况,见图 9 和表 2 所示。

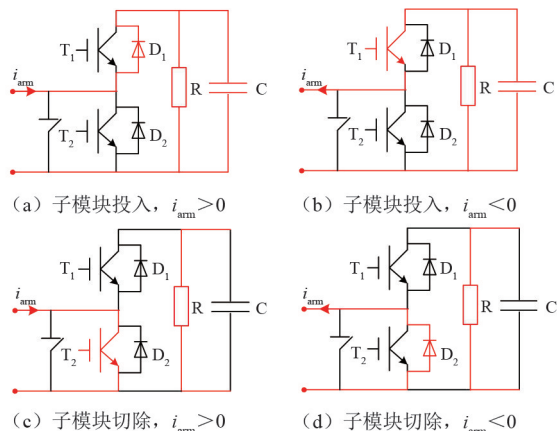


图 9 半桥子模块损耗分布

表 2 子模块开关能量

投切状态	$i_{arm} > 0$	$i_{arm} < 0$
切除→投入	$E_{off}$	$E_{on} + E_{rec}$
投入→切除	$E_{on} + E_{rec}$	$E_{off}$

针对  $\pm 320$  kV/1000 MW 海上风电柔性直流送出工程换流站换流阀进行损耗计算,结果见表 3。计算中取换流器调制比为 0.85,子模块开关频率控制约为 100 Hz。

由表 3 的计算结果可见,在 MMC 换流阀子模

块损耗中,开关器件导通损耗约占 70%,开关器件开关损耗约占 22%,均压电阻和电容器损耗约占 8%,其余损耗部分基本可忽略。送受端换流站换流阀总损耗率为 1.078%。

表 3  $\pm 320$  kV/1000 MW 海上风电柔直送出

工程换流站换流阀损耗

计算的损耗项目 (单个子模块损耗)	送端站	受端站
IGBT 导通损耗( $P_{V1}$ )/W	346.2	1 516.6
二极管导通损耗( $P_{V2}$ )/W	1 558.1	368.7
其他导通损耗( $P_{V3}$ )/W	10.3	10.5
直流电压产生损耗( $P_{V4}$ )/W	143.8	139.6
直流电容损耗( $P_{V5}$ )/W	64.2	73.7
IGBT 开关损耗( $P_{V6}$ )/W	435.1	450.6
二极管关断损耗( $P_{V7}$ )/W	149.3	143.3
模块控制板卡损耗( $P_{V9}$ )/W	4.0	4.0
阀损耗率/%	0.543	0.534
送受端换流站阀总损耗率/%	1.078	

同时,MMC 换流阀在整流状态时,二极管导通损耗占比较大;在逆变状态时,IGBT 导通损耗占比较大。该现象是由于整流和逆变状态下换流器桥臂电流直流偏置方向不同导致的。

### 4 MMC 换流阀损耗影响因素研究

针对海上风电柔直送出工程 MMC 换流阀,研究联接变压器阀侧三次谐波注入、换流器调制比和直流极线电压对换流阀损耗率的影响,提出降低换流阀损耗的建议。

#### 4.1 联接变压器阀侧三次谐波注入

图 10 给出了在  $\pm 320$  kV/1000 MW 送端换流站联接变压器阀侧注入三次谐波后,送端换流站损耗率计算值。

由图 10 计算结果可见,随着注入三次谐波幅值的增大,换流阀损耗率减小,主要体现为器件导通损耗和开关损耗的减小。与表 3 送端站损耗率 0.543% 相比,注入三次谐波即可减小损耗率。因为在联接变压器阀侧投入三次电压谐波注入策略后,在直流极线电压不变的情况下,可以抬高换流器输出交流线电压有效值;在输送容量和直流电压不变的情况下,可以降低交流电流的有效值和平均值,从而可以降低子模块损耗。因此,在条件允许的情况下,应考虑在联接变压器阀侧注入三次电压谐波,从

而减小换流阀损耗率。

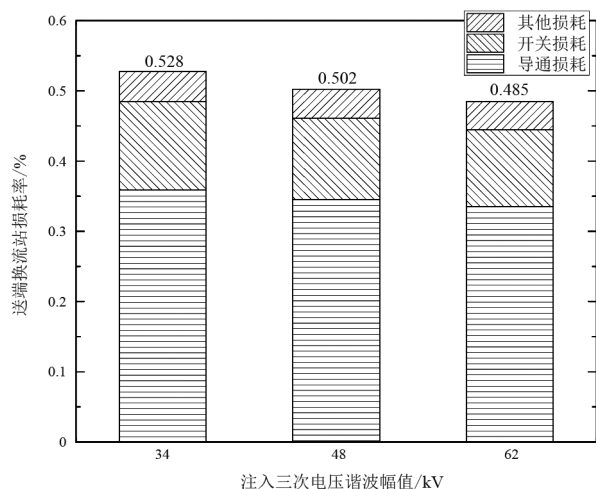


图 10 三次谐波注入对换流阀损耗的影响

## 4.2 改变调制比

图 11 给出了不同换流器调制比情况下,  $\pm 320$  kV/1000 MW 送端换流站换流阀损耗率的对比。

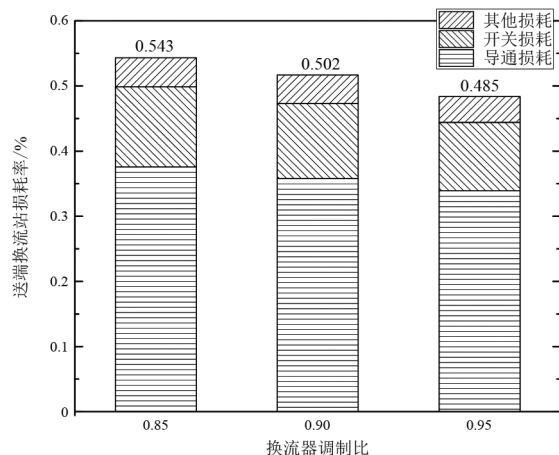


图 11 调制比对换流阀损耗的影响

由图 11 的计算结果可见,随着调制比的增大,桥臂电压升高的同时桥臂电流降低,桥臂电流减小后,流过开关器件的电流有效值和瞬时值均减小,进而通态损耗和开关损耗减小,使总损耗减小。因此,为了减小换流阀损耗,可采用较高的调制比。

## 4.3 直流极线电压的影响

在海上风电柔性直流送出工程的可行性研究阶段,会针对工程输电容量对直流电压等级进行选择。1000 MW 海上风电柔性直流送出可能采用的 3 个电压等级为  $\pm 250$  kV、 $\pm 320$  kV 和  $\pm 400$  kV。针对这 3 个电压进行换流阀损耗率计算,均采用对称单极接线和半桥子模块拓扑。 $\pm 250$  kV 和  $\pm 400$  kV 两种情况下的换流站主设备参数见表 6,  $\pm 320$  kV 的换流站主设备参数见表 1。

表 6 主设备参数

参数	$\pm 250$ kV/1000 MW	$\pm 400$ kV/1000 MW
	换流站	换流站
额定有功容量/MW	1000	1000
额定无功容量/Mvar	300	300
额定直流电压/kV	$\pm 250$	$\pm 400$
网侧额定电压/kV	525/230	525/230
阀侧额定电压/kV	260	416
每桥臂子模块数	238	381
子模块冗余度/%	8	8
桥臂电抗器电感/mH	65	165
子模块电容电压/kV	2.1	2.1
模块电容/mF	11.5	7.2

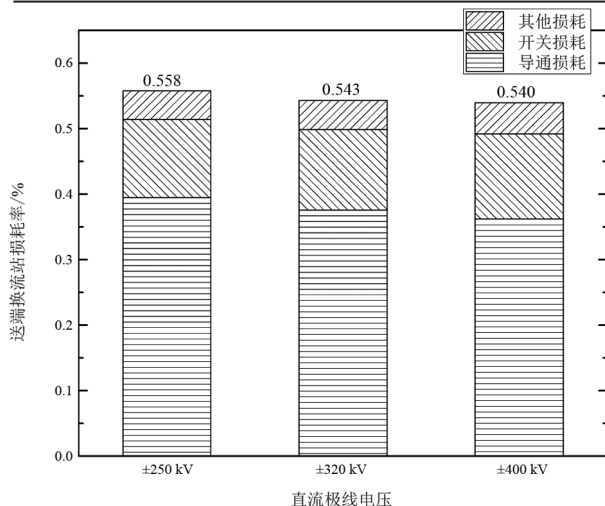


图 12 直流极线电压对换流阀损耗的影响

计算得到的送端站换流阀损耗情况如图 12 所示。3 种工况均取调制比为 0.85, 不考虑三次谐波注入。

由图 12 计算结果可知,当输电容量一定时,柔性直流输电系统换流器的损耗与输电电压密切相关。当输电电压减小时,阀模块数减少,但是桥臂电流增大,单个子模块损耗增大;当输电电压增大时,模块数增大,但是桥臂电流减小,单个子模块损耗减小。在所计算的常用电压等级下,随着电压等级从  $\pm 250$  kV 增加至  $\pm 400$  kV,送端站换流阀损耗率从 0.558% 减小到 0.540%。可见在给定输电容量的情况下,选择较高的直流电压等级可以降低换流阀损耗。

## 5 结论

上面针对海上风电柔性直流送出工程,在 PSCAD/EMTDC 中建立电磁暂态仿真模型,进行了 MMC 换流阀损耗计算研究,主要工作和结论如下:

1) 结合 IEC 62751-2, 给出了 MMC 换流阀损耗计算方法和关键计算参数的获取方法。

2) 针对典型直流电压和输送容量的  $\pm 320$  kV/1000 MW 海上风电柔性直流送出工程, 建立电磁暂态仿真模型计算了送端换流站和受端换流站的损耗率, 计算结果表明总损耗中器件导通损耗约占 70%, 开关损耗约占 22%, 均压电阻和电容器损耗约占 8%。送受端换流站换流阀总损耗率为 1.078%。

3) 研究了 MMC 换流阀损耗率的影响因素, 计算结果表明: 联接变压器阀侧注入三次谐波电压幅值越大, 换流阀损耗越小; 换流器调制比越大, 换流阀损耗越小; 在给定容量的情况下, 提高直流极线电压, 可以降低换流阀损耗。

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 李翔宇, ABEYNAYAKE G, 姚良忠, 等. 欧洲海上风电发展现状及前景[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(2): 116-126.
- [3] 时智勇, 王彩霞, 李琼慧. “十四五”中国海上风电发展关键问题[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 8-17.
- [4] 彭穗, 余浩, 许亮, 等. 海上风电场输电方式研究[J]. 电力勘测设计, 2021(11): 68-75.
- [5] 沙志成, 张丹, 赵龙. 大规模海上风电并网方式的研究[J]. 电力与能源, 2017, 38(2): 158-161.
- [6] 范声芳. 模块化多电平变换器(MMC)若干关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [7] 刘建涛, 王治华, 王珂. 不同结构电压源换流器损耗对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 105-110.
- [8] 张哲任, 徐政, 薛英林. 基于分段解析公式的 MMC-HVDC 阀损耗计算方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 34(6): 109-116.

- [9] ROHNER S, BERNET S, HILLER M, et al. Modulation, losses and semiconductor requirements of modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(8): 2633-2642.
- [10] 李强, 庞辉, 贺之渊. 模块化多电平换流器损耗与结温的解析计算方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 85-91.
- [11] 王希平, 李志刚, 姚芳. 模块化多电平换流阀 IGBT 器件功率损耗计算与结温探测[J]. 电工技术学报, 2019, 34(8): 1636-1646.
- [12] 易阳, 叶荣, 林章岁. 柔性直流输电系统损耗计算方法及其实测分析[J]. 电力建设, 2016, 37(6): 125-133.
- [13] 熊岩, 杨柳, 钟伟华, 等. 柔性直流换流阀功率模块损耗测量与试验[J]. 南方电网技术, 2020, 14(11): 17-35.
- [14] 王海田, 汤广福, 贺之渊, 等. 模块化多电平换流器的损耗计算[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(2): 112-118.
- [15] 杨立敏, 李耀华, 王平, 等. 适用于  $\pm 500$  kV/3000 MW 柔性直流输电换流器的电路拓扑损耗特性研究[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(6): 1-8.
- [16] 李标俊, 向权舟, 姚传涛, 等. 柔直换流阀损耗解析计算及其误差分析[J]. 中国电力, 2022, 55(4): 78-84.
- [17] 赵宇含, 王鑫, 赵成勇, 等. 半桥-全桥子模块混合型 MMC 的换流阀损耗分析方法[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2847-2855.
- [18] 罗永捷, 宋勇辉, 熊小伏, 等. 高压大容量 MMC 换流阀损耗精确计算[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7730-7741.
- [19] 荣飞, 黄韬, 饶宏, 等. MMC 换流阀最优三次谐波注入方法研究[J]. 高压电器, 2019, 55(7): 20-26.

#### 作者简介:

李浩原(1987), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为柔性直流输电、换流站绝缘配合等;

彭开军(1970), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为柔性直流输电、电力工程设计及设计管理等;

王江天(1993), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为柔性直流输电控制保护。  
(收稿日期: 2023-01-30)

(上接第 11 页)

- [10] 郑雁翎, 孙晓娟, 李维新, 等. 穿过不利散热区域地下电力电缆周期负荷因数的研究[J]. 高压电器, 2022, 58(5): 128-134.
- [11] 李长云, 孙丰田. 计及套管内气-液介质流体特性的高压直流电缆终端优化模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12): 4871-4883.
- [12] 刘英, 陈佳美. 高压 XLPE 电缆阻水缓冲层电-热场分析及模拟烧蚀试验研究[J]. 中国电机工程学报,

2022, 42(4): 1260-1271.

- [13] 邓显波, 欧阳本红, 孔祥海, 等. 大截面高压电缆导体交流电阻的优化[J]. 高电压技术, 2016, 42(2): 522-527.

#### 作者简介:

陈莉(1985), 女, 硕士, 研究方向为电气工程及其自动化;

邵千秋(1991), 男, 博士, 研究方向为电缆缺陷检测。

(收稿日期: 2023-02-15)