

# 计及运行工况的 MMC 换流阀可靠性建模与分析

李辉<sup>1</sup>, 邓吉利<sup>1</sup>, 姚然<sup>1</sup>, 赖伟<sup>1</sup>, 康升扬<sup>1</sup>, 江泽申<sup>1</sup>, 李金元<sup>2</sup>, 李尧圣<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 全球能源互联网研究院有限公司 先进输电技术国家重点实验室, 北京 102209)

**摘要:**模块化多电平换流器(MMC)换流阀作为高压直流输电系统的核心设备,其可靠性关系到整个输电系统的安全稳定运行。以典型高压直流输电 MMC 换流阀为例,考虑换流阀运行工况,建立基于故障树分析方法的 MMC 换流阀的可靠性模型,并对其薄弱环节进行分析。首先,建立融入换流阀运行工况 IGBT、二极管等元件的故障率模型;其次,考虑 MMC 换流阀功率模块和外围控制保护系统等,运用故障树分析方法,建立 MMC 换流阀故障树模型,得到相应可靠性指标的表达式;最后,根据可靠性指标公式计算各元件的故障率,采用概率灵敏度和关键灵敏度指标,辨识 MMC 换流阀的薄弱环节。结果表明:在整流和逆变工况下,MMC 换流阀和元件的故障率最大,而在纯无功工况下故障率最小;IGBT 模块和电源供给是 MMC 换流阀的薄弱环节,MMC 子模块性能对换流阀可靠性的影响最为显著。

**关键词:**高压直流输电;MMC 换流阀;运行工况;故障树;可靠性模型;薄弱环节

**中图分类号:**TM 721.1;TM 46

**文献标识码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2018.10.017

## 0 引言

随着高压直流输电 HVDC (High Voltage Direct Current) 系统电压等级和传输能力的提高,对换流器等电力电子设备的可靠性提出了更高的要求。近年来,模块化多电平换流器 MMC (Modular Multilevel Converter) 由于具有开关频率低、损耗小的优点,广泛应用于多个实际输电工程中<sup>[1-4]</sup>。而 MMC 换流阀作为 HVDC 系统的核心设备,元件种类多,结构复杂。如压接式 IGBT 器件具有双面散热、短路失效模式等独特的优势,逐渐取代焊接式 IGBT 应用于 MMC 换流阀中。在实际应用中,不同的拓扑结构、元件本身的可靠性水平以及复杂的运行工况等多种因素都对换流阀的可靠性造成不同程度的影响,最终影响换流阀的使用寿命。因此,评估 MMC 换流阀的可靠性、分析换流阀薄弱环节,对换流阀设备的运行维护和整个 HVDC 系统可靠性的提高都具有重要的现实意义。

在现有的 MMC 换流阀可靠性评估中,采用的元件模型大多为恒故障率模型,基于此模型,文献[5]采用状态转移法建立换流阀子模块的可靠性模型,研究了换流阀用的电力电子器件以及主电路的可靠性,计算不同冗余下的可靠性指标。文献[6]基于 k/n(G)模型,建立换流阀晶闸管级的可靠性模型,设计了 MMC 子模块的冗余数目。文献[7]考虑了

换流阀子模块、控制保护系统和阀冷系统等重要部件,建立了 MMC 可靠度函数。然而在实际运行中,MMC 换流阀运行工况复杂多变,其电力电子器件的故障率随之变化,以上文献均忽略了实际工况对换流阀元件可靠性的影响,评估结果存在较大误差。

用于电力电子器件可靠性的研究方法主要包括基于失效机理的器件可靠性评估方法<sup>[8-9]</sup>和基于可靠性手册的器件可靠性评估方法<sup>[10-11]</sup>。然而基于失效机理的器件可靠性评估方法往往只针对单一工况,使用受到限制;基于 FIDES Guide 2009<sup>[12]</sup>可靠性手册的器件可靠性评估方法中则可考虑不同运行工况对电力电子器件的影响,适用于换流阀元件的可靠性评估。

用于换流阀的可靠性分析方法一般包括故障树分析 FTA (Fault Tree Analysis) 方法、状态转移法、可靠性方框图等。由于故障树分析方法可以将换流阀故障与所有主要组成元件的故障有机地联系在一起,能较为全面地分析不同结构、不同元件的可靠性水平,且能快速准确地发现换流阀可靠性薄弱环节,为 MMC 换流阀组件的可靠性分析提供了可能,如文献[13]建立了换流阀冷却系统的可靠性模型来评估其可靠性;文献[14]从元件层面说明 HVDC 系统的可靠性影响程度,结合故障树分析方法及频率和持续时间法分析了 HVDC 系统元件的可靠性灵敏度。但是上述文献要么从 HVDC 系统角度进行可靠性分析,忽略了 MMC 换流阀组件的关键部件可靠性;要么从单个部件出发,分析其可靠性指标。如何从换流阀组件角度,结合运行工况,全面分析 MMC 子模块以及换流阀控制系统的可靠性及各个部件的薄弱环节对提高系统可靠性有着重要意义。

本文以基于压接式 IGBT 器件的 HVDC 系统

收稿日期:2017-09-23;修回日期:2018-06-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0901804);重庆市研究生科研创新项目(CYB18008)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFB0901804) and the Graduate Research and Innovation Foundation of Chongqing (CYB18008)

MMC 换流阀为研究对象,结合典型的 MMC 换流阀拓扑结构,考虑运行工况对元件故障率的影响,基于故障树分析方法,考虑子模块、控制保护系统以及阀冷系统等组成元件,建立详细的 MMC 换流阀可靠性模型。通过计算元件的概率灵敏度和关键灵敏度,运用 MATLAB 软件分析 MMC 换流阀组件的薄弱环节。

## 1 MMC 换流阀的工作特性

### 1.1 MMC 换流阀构成

MMC 拓扑结构如图 1 所示,其中每相分为上、下桥臂,每个桥臂由  $n$  个子模块 SM (Sub-Module) 和 1 个电抗器  $L_0$  串联组成。桥臂虚线框内代表由若干子模块串联组成的 MMC 换流阀。

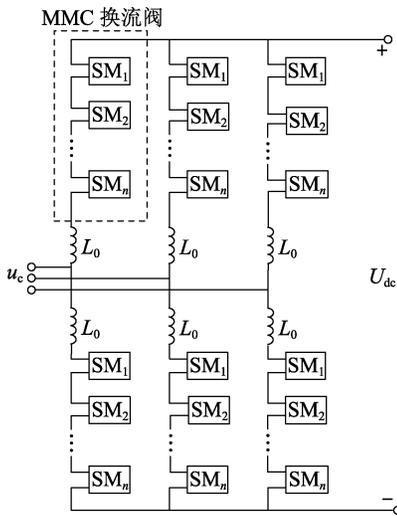


图 1 MMC 拓扑图

Fig.1 Topology of MMC

子模块是构成 MMC 换流阀的最小功率单元。如图 2 所示,每个子模块由 IGBT 模块 1 ( $T_1$ 、 $D_1$ )、IGBT 模块 2 ( $T_2$ 、 $D_2$ )、电容  $C$ 、电源供给、子模块控制系统等组成。其中,子模块控制系统包括驱动板、子模块控制器及光纤通信等。

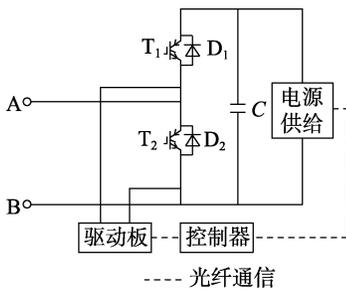


图 2 子模块结构图

Fig.2 Configuration of sub-module

除了子模块等基本设备之外,MMC 换流阀还由换流站控制保护系统、阀冷系统等构成。其中换流站控制保护系统包括极控和站控,阀冷系统包括内冷系统、外冷系统及监控系统<sup>[7]</sup>。

### 1.2 直流偏置下子模块工作特性

MMC 换流阀在传输有功时,桥臂存在偏置的直流分量,使得子模块内部元件导通时间不相等,影响元件的损耗分布。子模块的直流分量偏置如图 3 所示,其中  $I_{sm,dc}$  为子模块输入的直流分量,取电流从 A 端口流向 B 端口为参考正方向,虚线表示电流的流通路径,箭头代表电流的方向。

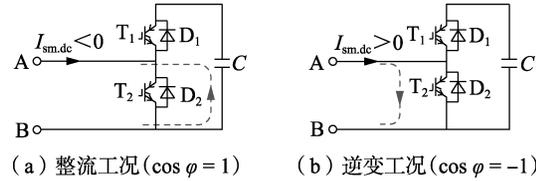


图 3 子模块直流分量偏置图

Fig.3 DC bias of sub-module

在整流工况时,子模块电流存在负向偏置的直流分量,此时电流主要通过元件  $D_2$ ;在逆变工况时,子模块电流存在正向偏置的直流分量,此时电流主要通过元件  $T_2$ ;在纯无功工况 ( $\cos \varphi = 0$ ) 时,MMC 传输有功为 0,子模块电流没有偏置的直流分量。

## 2 基于故障树的 MMC 换流阀可靠性模型

### 2.1 计及运行工况的元件故障率模型

MMC 换流阀的关键部件主要包含 IGBT、二极管和电容等元件。根据 MMC 子模块在不同运行工况下的电气运行参数,计算 IGBT 等电力电子器件的运行损耗和结温,结合 FIDES Guide 2009 导则可得到 MMC 换流阀元件的故障率模型。

IGBT 和二极管的总损耗<sup>[15-16]</sup>分别为:

$$P_T = \bar{P}_{con,T} + P_{sw,T} = I_{T,avg} U_{T0} + R_{CE} I_{T,rms}^2 + f_p (a_T + b_T I_{T,avg} + c_T I_{T,rms}^2) \quad (1)$$

$$P_D = \bar{P}_{con,D} + P_{sw,D} = I_{D,avg} U_{D0} + R_D I_{D,rms}^2 + f_p (a_D + b_D I_{D,avg} + c_D I_{D,rms}^2) \quad (2)$$

其中,下标 T 和 D 分别表示 IGBT 和二极管;  $\bar{P}_{con}$  和  $P_{sw}$  分别为元件平均导通损耗和开关损耗;  $I_{avg}$  和  $I_{rms}^2$  分别为元件在 1 个基波周期内的电流平均值和有效值;  $U_{T0}$  和  $R_{CE}$  为 IGBT 导通特性曲线拟合参数;  $U_{D0}$  和  $R_D$  为二极管导通特性曲线拟合参数;  $a_T$ 、 $b_T$  和  $c_T$  为 IGBT 开关损耗特性曲线拟合参数;  $a_D$ 、 $b_D$  和  $c_D$  为二极管反向恢复损耗特性曲线拟合参数。

IGBT 和二极管的结温<sup>[16-17]</sup>为:

$$\begin{cases} T_{j,T} = P_T (R_{thjC,T} + R_{thCH,T}) + T_H \\ T_{j,D} = P_D (R_{thjC,D} + R_{thCH,D}) + T_H \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $T_j$  为元件的结温;  $R_{thjC}$  和  $R_{thCH}$  分别为元件的内部热阻和外部热阻;  $T_H$  为散热器的温度。

依据 FIDES Guide 2009<sup>[12]</sup> 导则,提出 MMC 换流阀元件在  $i$  运行工况下的故障率统一计算模型:

$$\lambda_{com,i} = (\lambda_{0Th} \pi_{Th,i} + \lambda_{0TC} \pi_{TC,i}) \pi_{in} \pi_{Pm} \pi_{Pr} \quad (4)$$

其中,  $\lambda_{0Th}$  和  $\lambda_{0TC}$  分别为热应力因子和温度循环因子对应的元件基本故障率;  $\pi_{Th,i}$  和  $\pi_{TC,i}$  分别为在  $i$  运行工况下元件的热应力因子和温度循环因子;  $\pi_{in}$  为元件的过应力贡献因子;  $\pi_{Pm}$  为元件的制造质量的影响;  $\pi_{Pr}$  为元件寿命周期中的可靠性质量管理及控制水平的影响。

热应力因子为:

$$\pi_{Th,i} = \alpha e^{\beta \left( \frac{1}{293} - \frac{1}{T_i + 273} \right)} \quad (5)$$

其中,  $\alpha, \beta$  均为常数, 不同元件对应的具体数值不同, IGBT 和二极管取  $\alpha = 1, \beta = 8\ 122.8$ , 电容取  $\alpha = 0.85, \beta = 4\ 641.6$ ;  $T_i$  为  $i$  运行工况下的温度参数, 对应 IGBT 和二极管为结温, 对应电容为电路板平均温度。

温度循环因子为:

$$\pi_{TC,i} = \gamma \left( \frac{24}{N_0} \frac{N_{cyl}}{t_i} \right) \left[ \frac{\min(\theta_{cyl}, 2)}{\min(\theta_0, 2)} \right]^p \left( \frac{\Delta T_{cyl}}{\Delta T_0} \right)^{m_0} \times e^{1.414 \left( \frac{1}{313} - \frac{1}{T_{max\_cyl} + 273} \right)} \quad (6)$$

其中, 下标  $i$  表示元件处于  $i$  运行工况下;  $t_i$  为元件在  $i$  运行工况下的累计运行时间;  $N_{cyl}$  为元件在  $i$  运行工况下的结温循环波动次数;  $N_0$  为参考循环波动次数, 一般取值为 2;  $\theta_{cyl}$  为元件在  $i$  运行工况下的结温波动循环时间;  $\theta_0$  为参考循环时间, 一般取值为 12;  $\Delta T_{cyl}$  为元件在  $i$  运行工况下的结温波动幅值;  $T_{max\_cyl}$  为元件在  $i$  运行工况下的结温波动最大值;  $\gamma, p, m_0$  为不同元件的调整系数, IGBT 和二极管取  $\gamma = 1, p = 1/3, m_0 = 1.9$ , 电容取  $\gamma = 0.14, p = 1/3, m_0 = 1.9$  [12]。

此外, 其他可靠性参数取值如下 [12]: IGBT、二极管和电容的  $\lambda_{0Th}$  分别取 0.302 1、0.157 4 和 0.4,  $\lambda_{0TC}$  分别取 0.033 33、0.033 33 和 0.4;  $\pi_{in} = 3.383\ 7, \pi_{Pm} =$

0.71,  $\pi_{Pr} = 4$ 。

IGBT 和二极管构成一个 IGBT 模块, 因此 IGBT 模块的故障率为:

$$\begin{cases} \lambda_{1,1} = \lambda_{1,T1} + \lambda_{1,D1} \\ \lambda_{1,2} = \lambda_{1,T2} + \lambda_{1,D2} \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $\lambda_{1,1}$  和  $\lambda_{1,2}$  分别为 IGBT 模块 1 和 IGBT 模块 2 的故障率;  $\lambda_{1,T1}, \lambda_{1,T2}$  和  $\lambda_{1,D1}, \lambda_{1,D2}$  分别为 IGBT 和二极管的故障率。

### 2.2 MMC 换流阀故障树模型

根据目前 MMC 换流阀的主要构成元件和运行原理, 满足故障树假设条件: 底事件之间相互独立, 元件和系统只有正常和故障 2 种状态, 元件和系统寿命呈指数分布 [18]。则元件和系统的可靠度为:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (8)$$

其中,  $\lambda$  为故障率。

在建立 MMC 换流阀故障树时, 将 MMC 换流阀的故障状态作为顶事件, 然后根据顶事件导出子模块故障、换流站控制保护系统故障、阀冷系统故障 3 个中间事件, 再由这 3 个中间事件导出  $5n+5$  个基本事件, 最后将这一系列事件列成逻辑图, 即形成 MMC 换流阀故障树, 如图 4 所示。仅考虑子模块的冗余情况, 并假设所有子模块投入运行, 至少  $k$  个子模块发生故障才会导致整个串联子模块的故障。此时子模块冗余个数为  $k-1$ ; 当  $k=1$  时, 表示子模块无冗余。

考虑子模块冗余的情况, 此时表决门变成或门和与门的组合, 根据故障树分析方法, 采用下行法求得 MMC 换流阀故障树的最小割集为:

$$B_i = \begin{cases} \{X_i\} & i \in \{5n+1, 5n+2, \dots, 5n+5\} \\ \{X_i, X_j, \dots, X_m\} & i, j, m \in \{1, 2, \dots, 5\} \text{ 且} \\ & i \neq j \neq m, \text{card}(B) = k \end{cases} \quad (9)$$

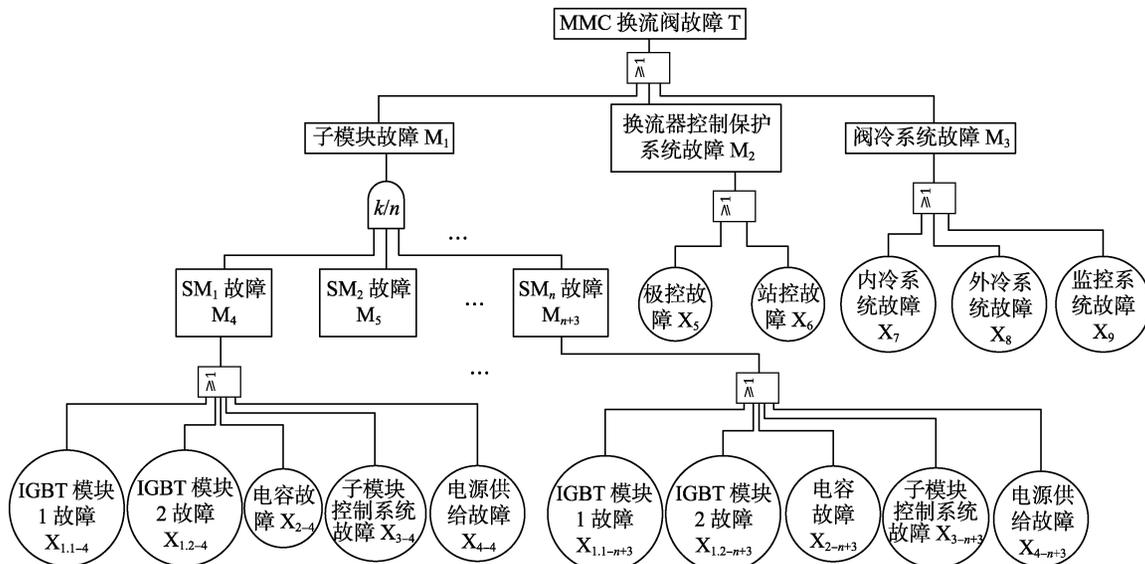


图 4 MMC 换流阀故障树

Fig.4 Fault tree diagram of MMC converter valves

其中,  $B_i$  为最小割集,  $X_i$ 、 $X_j$  和  $X_m$  为底事件,  $i$ 、 $j$  和  $m$  为底事件的编号;  $\text{card}(B) = k$  表示集合  $B$  中元素的个数为  $k$  个。通过分析可知, MMC 换流阀故障树的一阶最小割集有 5 个,  $k$  阶最小割集有  $5^k C_n^k$  个。

在故障树的表决门处, 每个子模块相互独立, 其可靠度满足如下关系:

$$R_{SM}(t) = R_{SM_1}(t) = \dots = R_{SM_n}(t) = R_1^2(t) R_2(t) R_3(t) R_4(t) \quad (10)$$

其中,  $t$  为运行时间;  $R_{SM}(t)$  为单个子模块可靠度;  $R_{SM_1}(t)$ 、 $\dots$ 、 $R_{SM_n}(t)$  分别为换流阀第 1、 $\dots$ 、 $n$  个子模块的可靠度;  $R_1(t)$ 、 $R_2(t)$ 、 $R_3(t)$ 、 $R_4(t)$  分别为 IGBT 模块、电容、子模块控制系统、电源供给的可靠度函数。

MMC 换流阀的子模块可靠度为:

$$R_{SM_n}(t) = \sum_{q=0}^{k-1} C_n^q (1 - R_{SM}(t))^q R_{SM}^{n-q}(t) \quad (11)$$

其中,  $q$  为子模块故障的个数,  $k-1$  为冗余数,  $q \leq k-1$ 。

MMC 换流阀的可靠度为:

$$R(t) = R_{SM_n}(t) R_5(t) R_6(t) R_7(t) R_8(t) R_9(t) \quad (12)$$

其中,  $R_5(t)$ 、 $R_6(t)$ 、 $R_7(t)$ 、 $R_8(t)$ 、 $R_9(t)$  分别为极控、站控、内冷系统、外冷系统、监控系统的可靠度函数。

MMC 换流阀发生故障的概率为:

$$P(T) = 1 - R(t) \quad (13)$$

MMC 换流阀的平均无故障工作时间 (单位为 a) 为:

$$t_{MTBF} = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (14)$$

MMC 换流阀的故障率 (单位为次/a) 为:

$$\lambda_T = 1/t_{MTBF} \quad (15)$$

### 2.3 薄弱环节分析

采用故障树分析方法辨识 MMC 换流阀的薄弱环节, 主要有 2 个灵敏度指标: 概率灵敏度和关键灵敏度。

概率灵敏度描述了故障树中各底事件故障率的变化对系统故障率变化的影响程度, 其实质是各系统可靠性指标对元件可靠性参数的偏微分<sup>[19]</sup>。因此, MMC 换流阀中第  $i$  个元件的概率灵敏度为:

$$I_p(i) = \frac{\partial P}{\partial P_i} \quad (16)$$

其中,  $P$  为 MMC 换流阀发生故障的概率;  $P_i$  为第  $i$  个元件发生故障的概率, 下标  $i$  表示元件编号。

对于概率灵敏度大的元件, 可以通过降低它的故障率来提升 MMC 换流阀的可靠性。但是概率灵敏度没有考虑元件本身的故障率, 对于自身故障率就很小的元件, 要降低其故障率难度很大, 因而引入

关键灵敏度的定义。MMC 换流阀中第  $i$  个元件的关键灵敏度为:

$$I_c(i) = \frac{\partial P}{\partial P_i} \frac{P_i}{P} \quad (17)$$

MMC 换流阀故障树分析流程图如图 5 所示, 主要步骤如下: 首先, 提取 MMC 换流阀的主要构成元件; 其次, 基于运行工况建立元件的故障率模型, 采用故障树方法建立 MMC 换流阀的可靠性模型; 最后, 计算 MMC 换流阀的故障率、概率灵敏度和关键灵敏度, 实现对 MMC 换流阀在不同运行工况下的可靠性评估与薄弱环节分析。

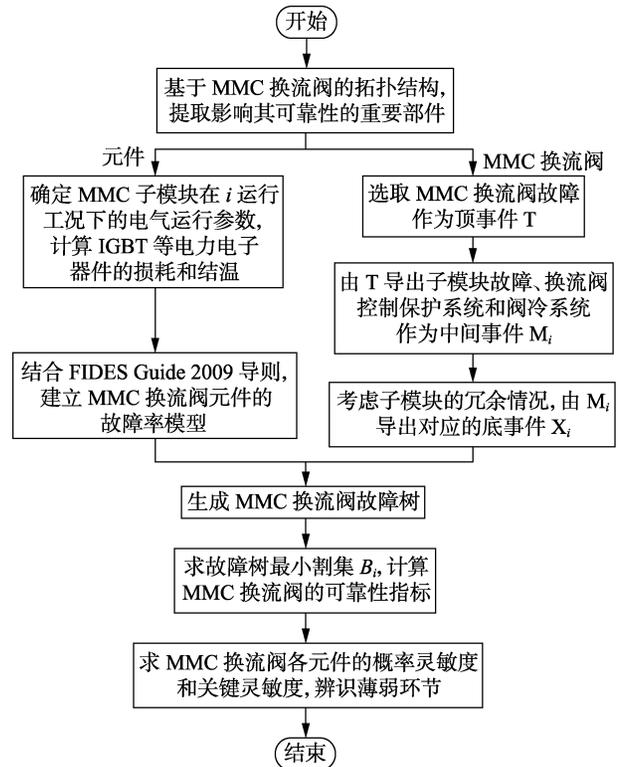


图 5 MMC 换流阀故障树分析流程

Fig.5 Flowchart of fault tree analysis for MMC converter valves

### 3 算例分析

为了评估 MMC 换流阀的可靠性, 辨识薄弱环节, 某 MMC 换流阀参数如下<sup>[7]</sup>: 桥臂由 250 个额定电压为 1.6 kV、额定电流为 1 kA 的子模块构成, MMC 换流阀的额定直流电压为  $\pm 200$  kV, 不计运行工况时, MMC 换流阀主要元件的可靠性参数见表 1。

为了研究 MMC 换流阀在不同运行工况下的可靠性水平, 假设所有子模块投入运行, 对 MMC 换流阀输出  $S_N = 40 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 、功率角  $\varphi$  从  $0 \sim 2\pi$  变化时的全工况情况进行了扫描计算, 得到元件和 MMC 换流阀的故障率。

不同运行工况下的元件故障率如图 6 所示。从图 6(a) 元件总损耗可知, 在同一工况下, 不同元件的

表 1 元件故障率

Table 1 Failure rate of each component

| 元件编号 | 元件              | $\lambda / (\text{次} \cdot \text{a}^{-1})$ |           |
|------|-----------------|--|-----------|
| 1    | IGBT 模块 (未考虑工况) | 0.000 876                                  |           |
| 2    | 子模块             | 电容 (未考虑工况)                                 | 0.001 752 |
| 3    |                 | 电源供给                                       | 0.035 040 |
| 4    |                 | 子模块控制器                                     | 0.001 402 |
| 5    | 换流站控制           | 极控   | 0.015     |
| 6    | 保护系统            | 站控   | 0.015     |
| 7    | 内冷系统            |  | 0.014     |
| 8    | 阀冷系统            | 外冷系统                                       | 0.006     |
| 9    | 监控系统            |  | 0.020     |

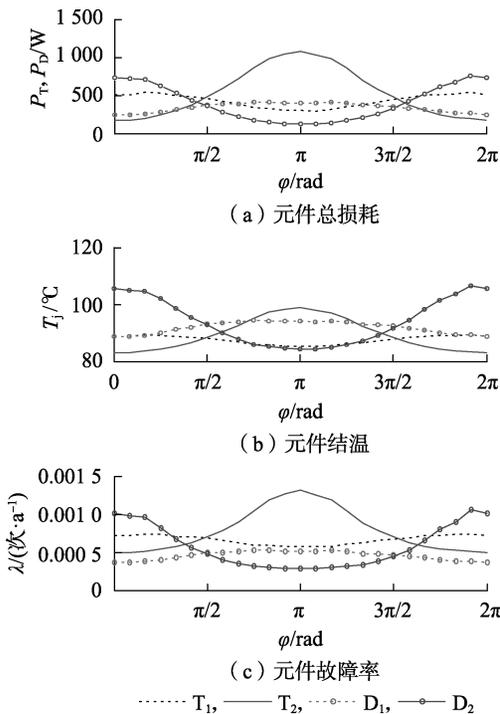


图 6 不同运行工况下的元件故障率

Fig.6 Failure rates of components under different operating conditions

损耗不等;在不同工况下,同一元件的损耗不等。由于直流偏置影响元件的损耗分布,因此在整流工况下,子模块负向偏置的直流分量最大,导致  $D_2$  的损耗最大;在逆变工况下,子模块正向偏置的直流分量最大,导致  $T_2$  的损耗最大;而在纯无功工况下,直流分量为 0,元件的损耗分布比较均匀。而元件损耗影响元件结温,进而影响元件的故障率。从图 6(c) 元件故障率可知,对于 IGBT 模块内部元件,  $T_2$  和  $D_2$  的故障率随工况变化明显,整流工况下  $D_2$  的故障率最大,逆变工况下  $T_2$  的故障率最大,纯无功工况下 IGBT 的故障率均大于二极管的故障率。

不同运行工况下的 MMC 换流阀故障率如图 7 所示。对于 IGBT 模块,IGBT 模块 1( $SW_1$ )的故障率小于 IGBT 模块 2( $SW_2$ )的故障率。对于 IGBT 模块 2、电容和 MMC 换流阀,它们的故障率随运行工况的变化而变化,且在整流和逆变工况下故障率最大,在

纯无功工况下故障率最小。与恒故障模型相比,本文考虑运行工况后计算的 MMC 换流阀和元件故障率明显增大,验证了所建模型的有效性。

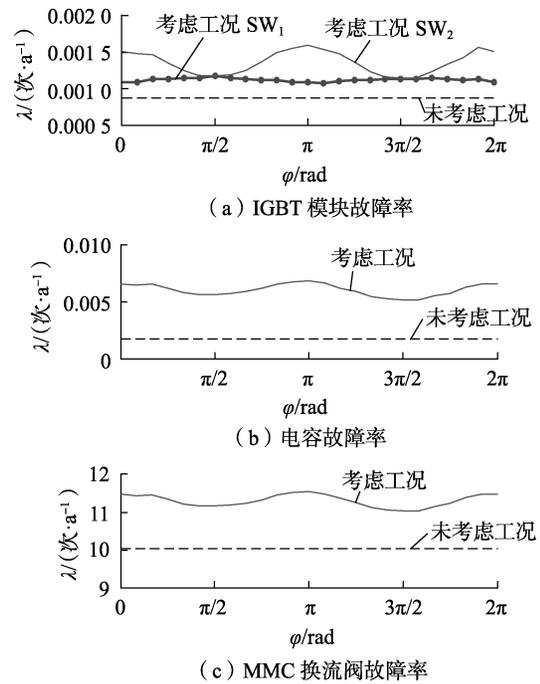


图 7 不同运行工况下的 MMC 换流阀故障率

Fig.7 Failure rates of MMC valves under different operating conditions

各元件的灵敏度指标如图 8 所示,在不同运行工况下元件的概率灵敏度相等,而关键灵敏度发生变化。从图 8(a) 各元件概率灵敏度可知,IGBT 模

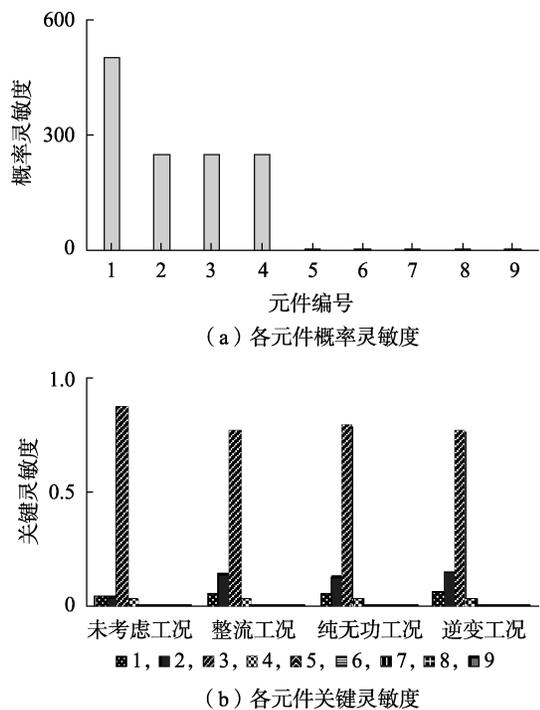


图 8 不同运行工况下的元件灵敏度

Fig.8 Sensitivity indices of components under different operating conditions

块的概率灵敏度最大,子模块的概率灵敏度远远大于换流站控制保护系统和阀冷系统。在子模块中,IGBT 模块的概率灵敏度最大,是子模块的薄弱环节,因此建议主要改善 IGBT 模块的性能来提升子模块的可靠性,如采用压接式双面散热 IGBT 器件。从图 8(b)各元件关键灵敏度可知,在考虑元件自身故障率对 MMC 换流阀的影响后,电源供给部分的关键灵敏度最大,子模块的关键灵敏度仍然大于换流站控制保护系统和阀冷系统。同时,考虑运行工况后,IGBT 模块和电容的关键灵敏度升高,电源供给系统的关键灵敏度有所降低,这是考虑运行工况后 MMC 换流阀和元件故障率明显增大而引起的。从关键灵敏度上来看,电源供给和子模块是 MMC 换流阀的薄弱环节。因此,通过改善电源供给的性能,可以有效降低 MMC 换流阀的故障率,提升可靠性。

#### 4 结论

本文以 HVDC 系统 MMC 换流阀为研究对象,计及运行工况对元件故障率的影响,运用故障树分析方法,建立了详细的 MMC 换流阀可靠性模型。基于所建可靠性模型,通过计算各元件的灵敏度指标对 MMC 换流阀进行薄弱环节分析,得到以下结论。

a. 建立了基于故障树分析的 MMC 换流阀可靠性计算流程,计算了 MMC 换流阀和关键元件在不同运行工况下的故障率,与恒故障率模型相比验证了所建模型的有效性。

b. 由于直流偏置的影响,MMC 换流阀和元件的故障率随运行工况的变化而变化,且在整流和逆变工况下故障率最大,在纯无功工况下故障率最小。

c. 通过薄弱环节分析,在不同工况下 MMC 换流阀各元件的概率灵敏度相等,关键灵敏度不等。考虑工况后,IGBT 模块和电容的关键灵敏度升高,电源供给系统的关键灵敏度有所降低。

d. MMC 子模块的概率灵敏度和关键灵敏度均大于换流站控制保护系统和阀冷系统,可见子模块性能对 MMC 换流阀的可靠性至关重要。基于 MMC 换流阀组件中,IGBT 模块的概率灵敏度较大,而电源供给系统的关键灵敏度较大,两者是 MMC 换流阀的薄弱环节。

由于 MMC 换流阀的可靠性不仅涉及换流阀的内部结构,而且还与 MMC 换流阀的控制策略、内部环流以及子模块 IGBT 器件封装的可靠性等都密切相关,如何计及控制策略以及压接式 IGBT 器件可靠性因素,准确计算 MMC 换流阀可靠性,还有待进一步深入研究。

#### 参考文献:

[ 1 ] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2012: 27-57.

- [ 2 ] 董云龙,凌卫家,田杰,等. 舟山多端柔性直流输电控制保护系统[J]. 电力自动化设备,2016,36(7):169-175.  
DONG Yunlong, LING Weijia, TIAN Jie, et al. Control & protection system for Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 169-175.
- [ 3 ] WESTERWELLER T, FRIEDRICH K, ARMONIES U, et al. Trans bay cable-world's first HVDC system using multilevel voltage-sourced converter[C]//Proceedings of CIGRE. Paris, France: CIGRE, 2010:1-7.
- [ 4 ] 马为民,吴方劫,杨一鸣,等. 柔性直流输电技术的现状及应用前景分析[J]. 高电压技术,2014,40(8):2429-2439.  
MA Weimin, WU Fangjie, YANG Yiming, et al. Flexible HVDC transmission technology's today and tomorrow[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2429-2439.
- [ 5 ] 丁明,王京景,宋倩. 基于 k/n(G)模型的柔性直流输电系统换流阀可靠性建模与冗余性分析[J]. 电网技术,2008,32(21): 32-36.  
DING Ming, WANG Jingjing, SONG Qian. Reliability modeling and redundancy analysis of converter valves for VSC-HVDC power transmission system based on k-out-of-n; G model[J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 32-36.
- [ 6 ] 郭焕,温家良,汤广福,等. 直流输电换流阀主电路的可靠性分析与优化设计[J]. 中国电机工程学报,2009,29(增刊1): 39-43.  
GUO Huan, WEN Jialiang, TANG Guangfu, et al. Reliability analysis and optimal design of main circuit within HVDC thyristor valve[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(Supplement 1): 39-43.
- [ 7 ] 王秀丽,郭静丽,庞辉,等. 模块化多电平换流器的结构可靠性分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(7):1908-1914.  
WANG Xiuli, GUO Jingli, PANG Hui, et al. Structural reliability analysis of modular multi-level converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1908-1914.
- [ 8 ] BUSCA C, TEODORESCU R, BLAABJERG F, et al. An overview of the reliability prediction related aspects of high power IGBTs in wind power applications[J]. Microelectronics Reliability, 2011, 51(9): 1903-1907.
- [ 9 ] JOSEF L, HEINRICH S, UWE S, et al. Semiconductor power devices [M]. New York, USA: IEEE Press, 2011: 360-368.
- [ 10 ] ZORAN M, VLADO S. Lifetime modeling and prediction of power devices[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Integrated Power Systems (CIPS). Nuremberg, Germany: IEEE, 2008:1-9.
- [ 11 ] PECHT M, GU J. Physics-of-failure-based prognostics for electronic products[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2009, 31(3): 309-322.
- [ 12 ] FIDES Group. Reliability methodology for electronic systems[EB/OL]. [2017-05-23]. <http://www.docin.com/p-448800074.html>.
- [ 13 ] 姜海波,翟宾,贺新征,等. 高压直流输电换流阀冷却系统可靠性评估[J]. 电力安全技术,2014,16(5):60-63.  
JIANG Haibo, ZHAI Bin, HE Xinzhen, et al. Reliability assessment of the cooling system in HVDC system[J]. Power Security Technology, 2014, 16(5): 60-63.
- [ 14 ] 周家启,陈炜骏,谢开贵,等. 高压直流输电系统可靠性灵敏度分析模型[J]. 电网技术,2007,31(19):18-23.  
ZHOU Jiaqi, CHEN Weijun, XIE Kaigui, et al. A sensitivity analysis model of HVDC transmission system reliability evaluation[J]. Power System Technology, 2007, 31(19): 18-23.
- [ 15 ] 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.

- LI Qiang, PANG Hui, HE Zhiyuan. Analytic calculating method for loss and junction temperature of modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 85-91.
- [16] 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.
- WANG Haitian, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. Power losses calculation of modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 112-118.
- [17] 屠卿瑞, 徐政. 基于结温反馈方法的模块化多电平换流器型高压直流输电阀损耗评估[J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 1506-1512.
- TU Qingrui, XU Zheng. Dissipation analysis of MMC-HVDC based on junction temperature feedback method[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1506-1512.
- [18] 陆丹, 袁越. 基于故障树蒙特卡罗模拟法的孤岛微电网薄弱环节识别[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4): 38-44.
- LU Dan, YUAN Yue. Weak part identification based on fault-tree Monte Carlo simulation for islanded microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 38-44.
- [19] 李生虎, 华玉婷, 董王朝, 等. 计及高压隔离开关设备的 UHVDC 系统 FTA 评估[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 74-80.
- LI Shenghu, HUA Yuting, DONG Wangchao, et al. FTA of UHVDC system including high-voltage disconnectors[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 74-80.

#### 作者简介:



李 辉

李 辉(1973—),男,浙江永康人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事风力发电技术、SiC 电力电子器件应用与可靠性的研究工作(E-mail: cqulh@163.com);

邓吉利(1993—),女,四川隆昌人,硕士研究生,主要从事电力电子器件可靠性和状态监测研究工作;

姚 然(1990—),男,重庆人,博士研究生,主要从事电力电子器件可靠性和失效机理研究工作。

## Reliability modeling and analysis of MMC converter valve considering operation conditions

LI Hui<sup>1</sup>, DENG Jili<sup>1</sup>, YAO Ran<sup>1</sup>, LAI Wei<sup>1</sup>, KANG Shengyang<sup>1</sup>, JIANG Zeshen<sup>1</sup>, LI Jinyuan<sup>2</sup>, LI Yaosheng<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Transmission Technology, Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

**Abstract:** As the core equipment of HVDC (High Voltage Direct Current) transmission system, the reliability of MMC (Modular Multilevel Converter) converter valve is related to the safe and stable operation of the whole transmission system. Considering the influence of working condition, the reliability model is established and the weak components are analyzed for the traditional HVDC transmission MMC converter valve based on the fault tree analysis method. Firstly, the failure rate models of IGBT and diode are established considering the influence of operating conditions. Then, the fault tree model of the MMC converter valve is established by the fault tree analysis method, and the corresponding reliability index formulas are obtained considering the power module and peripheral control protection system. Finally, the failure rate of each component is calculated according to the reliability index formula, and the weak components of the MMC converter valve are identified based on the probability sensitivity and the critical sensitivity indexes. The results show that the failure rate of the MMC converter valve and component is biggest under the conditions of rectifier and inverter, and the failure rate is smallest under pure reactive power condition, the IGBT module and the power supply are the weak components of the MMC valve, and the performance of the MMC submodule has the most significant influence on the reliability of the valve.

**Key words:** HVDC power transmission; MMC converter valves; operation conditions; fault tree; reliability model; weak parts