

异构型换流器的多任务剖面可靠性分析方法

朱雯清¹,赵西贝¹,熊 岩²,周月宾²,赵成勇¹

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206;

2. 南方电网科学研究院有限责任公司 直流输电技术国家重点实验室,广东 广州 510663)

摘要:现有关于模块化多电平换流器(MMC)可靠性分析的研究大多针对子模块结构独立的换流器,对于多种低成本、多模态的异构拓扑,尚缺乏有效的可靠性分析方法,因此针对异构型换流器的可靠性分析对扩展其应用边界有重要的意义。总结了异构型MMC的特征,以桥臂嵌套型MMC为例,提出了一种考虑桥臂切换导致的多任务剖面与工作故障延续性且适用于异构型MMC的可靠性建模方法。通过分析换流器的不同运行状态,建立了马尔可夫模型,并分析了其冗余配置方案。基于仿真算例计算了桥臂嵌套型MMC的可靠性,分析了子模块冗余配置对其可靠性的影响,并传统模型进行对比,验证了所提方法可为多开关状态的异构型MMC的可靠性分析及冗余配置提供策略参考。

关键词:模块化多电平换流器;可靠性分析;马尔可夫模型;多任务剖面

中图分类号:TM46

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202308030

0 引言

模块化多电平换流器(modular multi-level converter, MMC)是直流输电的主要装置,具有模块化程度高、扩展性好的优点。MMC中所含的大量功率器件与电容器的可靠性相对薄弱^[1],随着MMC进一步演化发展,换流器结构呈现多样化态势,运行工况复杂度增加,MMC面临更加复杂的可靠性问题^[2-3]。

工程中采用的换流器拓扑大多为半桥型MMC与半全混合型MMC,已有研究也均基于以上2类较为规整的换流器结构。半桥型MMC由单一子模块组成,假设器件寿命服从指数分布且元件为恒故障率模型^[4],采用故障密度分布函数和伽马分布可以量化半桥型MMC的可靠性。为了提高MMC的可靠性,配置一定数量的冗余子模块替换运行器件发生损坏的子模块,以保证MMC的稳定运行与故障处理能力。半全混合型MMC由半桥子模块(half-bridge sub-module, HBSM)与全桥子模块(full-bridge sub-module, FBSM)构成,为独立子模块串联构成的混合型MMC。对于由独立子模块构成的混合型MMC,通常采用等微增率冗余配置方法^[5]建立其三维冗余函数,并对离散数据进行曲率求解与优化,能够同时满足可靠性与经济性要求。

然而,半桥MMC不具备直流故障穿越能力,虽然半全混合MMC具有直流故障穿越能力,但在工程

应用时的FBSM占比较重,会降低换流器的经济性。因此,许多具有直流故障清除能力且经济性较好的异构型MMC(如桥臂嵌套型MMC(embedded full-bridge MMC, EFB-MMC)^[6]、桥臂复用MMC^[7]、增强型MMC^[8]、集成断路器型MMC^[9]等)被提出,异构型MMC多模态与运行方式的灵活性决定了其具有多种开关组合形态,在不同的运行工况下具有不同的等效拓扑,且不同支路中不同元件的失效将会导致不同的运行状态。学者们对异构型MMC的研究颇多,但未涉及可靠性分析,使其工程应用仍有一定的限制。

已有针对换流器的传统可靠性分析大多是针对包含独立子模块结构的MMC^[10-14],其开关组合形态单一,不同工况下的等效拓扑固定。对于涉及支路切换的电气设备,文献[15]从仿真时间尺度的角度提出当瞬态过程变换剧烈时,需要考虑支路切换对模型的影响,但是没有对该切换进行可靠性建模分析,且没有对时间尺度进行时长划分。文献[16]将±800 kV柔性直流换流站的正常运行状态、故障运行状态、检修运行状态等效为三状态模型,根据元件的功能区分其功能属性,分别进行可靠性建模,为区分换流站内支路的功能属性提供了解决思路。文献[17]基于混合直流断路器的运行原理,考虑分合闸过程对可靠性模型产生的影响,提出了考虑多任务剖面下的可靠性模型,并传统建模方法进行对比分析,验证了其合理性。虽然上述研究从多端柔性直流换流站、断路器等方面表明计及支路切换对可靠性的影响能够提高建模的合理性,但均未分析异构型换流器。

综合上述分析,针对已有研究中可靠性建模方法无法反映异构型MMC中支路切换过程的问题,本

收稿日期:2023-06-01;修回日期:2023-07-30

在线出版日期:2023-08-25

基金项目:直流输电技术国家重点实验室开放基金资助项目(SKLHVDC-2022-KF-05)

Project supported by the Open Fund of State Key Laboratory of HVDC(SKLHVDC-2022-KF-05)

文提出了一种异构型 MMC 的通用可靠性建模方法。首先分析了异构型 MMC 的拓扑和共性特征,以 EFB-MMC 为例,介绍了其工作原理;分析了不同支路的切换过程以及故障延续性对运行状态的影响,将其运行工况分为 4 个任务剖面,针对不同任务剖面之间的转移关系建立状态转移模型,并结合等微增率冗余配置方法,对 EFB-MMC 进行可靠性量化评估。

1 异构型 MMC 原理分析

1.1 异构型 MMC

文献[6-9]研究的均为具备故障自清除能力的异构型 MMC 拓扑,以单相桥臂为例,其拓扑结构如附录 A 图 A1 所示。这 4 种拓扑在故障清除的运行方式上具有一定的代表性,本文提取了这 4 种拓扑的共性特征,具体如下。

1) 换流站的多模态化不局限于子模块结构。

文献[6]采用 4 个桥臂外嵌部分 HBSM 构成桥臂嵌套(embedded full-bridge, EFB)阀段,桥臂整体为 H 桥结构,EFB 阀段与串联的 HBSM 构成桥臂。文献[7]设置了复用桥臂,利用由电力电子器件构成的开关投切复用桥臂,其中复用桥臂由独立子模块串联构成。文献[8]在上、下桥臂电感并联电感投切支路,在直流输出侧增加超快速隔离开关(ultra-fast disconnect, UFD),并联电流泄放支路。文献[9]在三相桥臂外并联换流器侧能量吸收支路,在直流输出侧增加由开关结构构成的主支路,并联线路侧能量吸收支路。

2) 故障后的运行方式中涉及支路投切。

发生故障后:文献[6]中的 EFB 阀段需进行桥臂的投切以实现 EFB 阀段负电压的输出,抑制故障电流;文献[7]根据桥臂电压的判断逻辑,切换投切开关,将具有负电平输出能力的复用桥臂投入换流站,输出负电压;文献[8]通过电感投切支路的接入,旁路桥臂电感,与子模块构成回路,暂停换流站向故障点馈入能量;文献[9]导通换流器侧的能量吸收支路以实现换流站中能量的转移,协助主支路开断。

综上所述,分析异构型 MMC 的共性特征可发现,异构型 MMC 在不同的运行工况下具有不同的等效拓扑,且不同支路中不同元件的失效将会导致不同的运行状态。由于异构型 MMC 的拓扑形态差异性大,无法将其概括为统一结构拓扑,综合比较 4 种 MMC 拓扑的经济性与故障清除能力^[6-9]可知,EFB-MMC 融合了换流站与混合式直流断路器技术,与半桥型 MMC 具有相同的运行损耗与故障清除速度,且更具经济性,因此本文以 EFB-MMC 为例,分析其运行原理,建立其可靠性模型,提出适用于异构型 MMC 的可靠性建模方法。

1.2 EFB-MMC 的拓扑结构及运行原理

EFB-MMC 的拓扑结构如附录 A 图 A2 所示。为了方便叙述,本文将 EFB 阀段内嵌套的 HBSM 称为 HBSM_E ,将 EFB 阀段外嵌套的 HBSM 称为 HBSM_H 。EFB 阀段中的桥臂 1、4 为通流支路,桥臂 2、3 为阻断支路,通流支路、阻断支路与 HBSM_E 三者之间的相互配合实现了故障后嵌套阀段的负电压输出,抑制了故障电流。

如图 A2 所示,EFB 阀段中的桥臂 1、4 为通流支路,用于承载正常的工作电流,由绝缘栅双极晶体管(insulate gate bipolar transistor, IGBT)反串联的负载换相开关(load commutation switch, LCS)与 UFD 构成;桥臂 2、3 为阻断支路,用于承载并切断故障电流,由晶闸管串联 IGBT 后反并联串联的二极管组成。

EFB-MMC 的 4 种运行工况如图 1 所示(图中 k 为阀段内串联子模块数量, U_c 为每个 HBSM_E 中的电容电压),具体描述如下。

1) 稳态运行工况: EFB 阀段中的桥臂 1、4 导通,桥臂 2、3 关断, EFB 阀段对外输出正电压。

2) 桥臂切换工况: 检测到发生直流故障后,旁路 EFB 阀段中的 HBSM_E , 导通桥臂 2、3, 同时关断桥臂 1、4 中的 IGBT 与 UFD。

3) 故障清除工况: UFD 可靠分断之后,投入 HBSM_E , 此时桥臂 2、3 导通, EFB 阀段对外输出负电压, 其与 HBSM_H 输出的正电压抵消, 抑制故障电流, 直至故障电流降至 0。

4) 恢复运行工况: 故障线路切除后恢复系统, 旁路 HBSM_E , 导通桥臂 1、4 中的 IGBT 并合闸 UFD, 关闭桥臂 2、3, UFD 完全合闸后, 重新投入 HBSM_E , 阀段重新输出正电压, EFB-MMC 恢复稳定运行。

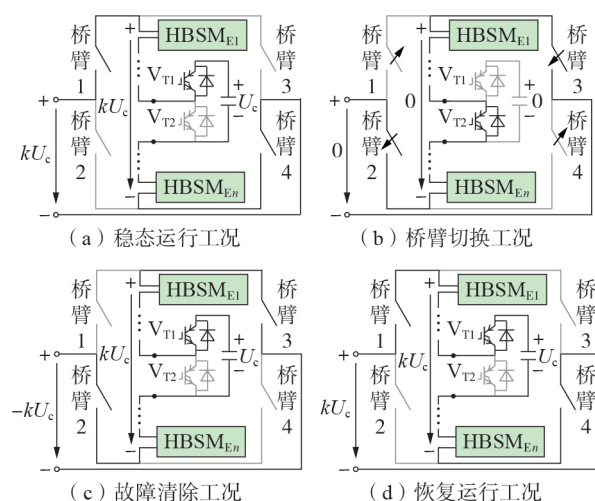


图1 EFB 阀段的 4 种运行工况

Fig.1 Four operating conditions of EFB valve

发生故障时, EFB-MMC 中的 EFB 阀段发挥故障清除功能, 因此 EFB-MMC 的可靠性建模需要基于 EFB 阀段的故障清除模式展开研究。

2 EFB-MMC的多任务剖面可靠性建模

由前文的分析可知,EFB-MMC本质上为一个多任务剖面系统^[18]。在稳态工况下,EFB-MMC的运行方式与半桥型MMC相同,发生故障后EFB阀段的嵌套桥臂翻转,输出负电压,直至故障清除后恢复运行。EFB阀段在故障工况下的桥臂切换动作表明,阀段中的各组件并非在全部任务剖面均参与工作,而是仅在桥臂切换瞬间所有元件参与工作,且该情况仅出现在毫秒级时间尺度上。除此之外,工作状态下的元件故障对当前任务剖面以及下一任务剖面正常运行的影响需要具体分析。

2.1 EFB-MMC任务剖面的划分及故障影响分析

每个阶段任务是可靠性分析中的一个任务剖面,相应地,针对不同阶段任务可以分别建立其任务可靠性模型。根据EFB-MMC所连线路是否发生直流故障以及EFB-MMC的运行状态,可将其任务过程划分为4个阶段(MP₁—MP₄),分别对应1.2节中所述的4种运行工况,如图2所示。图中:橙色方框为工作故障,表示该模块发生故障会影响该时刻的运行工况;绿色方框为非工作故障,表示该模块发生故障时不会影响当前的运行工况,但会影响下一运行工况;箭头表示故障对运行工况的影响。

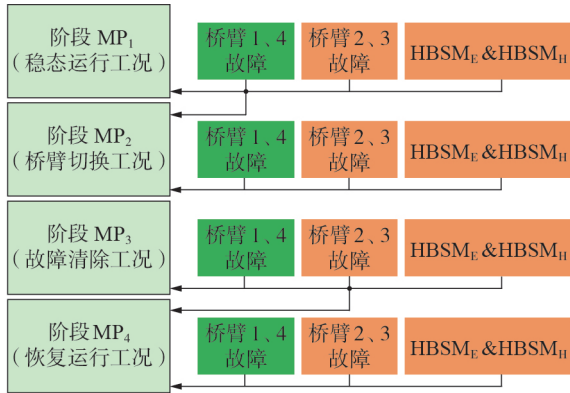


图2 EFB-MMC组件故障的影响

Fig.2 Influence of EFB-MMC component failure

对于图2中工作故障、非工作故障的划分原因如下:当处于工作状态的支路发生故障时,属于工作故障;当处于非工作状态的支路发生故障时,属于非工作故障。以具体工况之间的过渡进行说明:由于IGBT与二极管均为压接型元件,发生故障后呈现短路状态。在阶段MP₁,若桥臂1、4发生故障,则呈现短路状态,不会影响稳态电流的对外传输,但会影响线路发生故障后桥臂1、4的关断。而桥臂2、3在阶段MP₁起到承压作用,若桥臂2、3发生故障,则电压会击穿桥臂2、3上的电力电子器件,与桥臂1、4形成短路回路,影响阶段MP₁的正常运行。此时桥臂1、4故障为工作故障,桥臂2、3故障为非工作故障。同

理,在阶段MP₃,故障电流流经桥臂2、3,若桥臂2、3发生故障,则呈现短路状态,故障电流仍能流通,不影响故障清除状态,但会影响故障清除后恢复过程中的桥臂切换。而桥臂1、4在阶段MP₃起到承压作用,若桥臂1、4发生故障,则电压会击穿桥臂1、4上的电力电子器件,与桥臂2、3形成短路通路,影响阶段MP₃的正常运行。此时桥臂1、4故障为非工作故障,桥臂2、3故障为工作故障。

根据上述分析,本文对工作元件的故障延续性进行定义:在某一运行工况下,工作元件的故障对当下运行状态不产生影响,但若不能及时发现并维修,则会对其他工况的正常运行产生影响。这种由先前任务剖面的工作故障造成之后任务剖面的非工作故障的现象被称为工作元件的故障延续性。

2.2 嵌套桥臂的可靠性建模与冗余配置

假设子模块中各电力电子元件的寿命符合指数分布,在实际运行状况下, n 个元件在 t 时刻的失效个数为 i' ,则可得到各元件的故障率 λ 。假设系统中各元件处于指数寿命曲线^[16]的稳定运行期,则 t 时刻元件的可靠性 $R(t)$ 可表示为:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1)$$

1) 桥臂1、4。

桥臂1、4主要由UFD和LCS构成,其中LCS由数个反串联的IGBT组成。当考虑冗余数为 N_{ox} (其中 x 表示设备 x)时,仅当 $N_{ox}+1$ 个LCS或UFD发生故障时,才会导致桥臂1、4故障。建立桥臂1、4的马尔可夫状态转移图,如附录A图A3所示。

桥臂模块原理图如附录A图A4所示。图A4(a)中IGBT的旁路开关 K_1 和晶闸管 K_2 仅在特殊运行状况才使用,在热备用冗余方式下,暂不考虑 K_1 和 K_2 的故障率。LCS的可靠性 $R_L(t)$ 由IGBT模块的可靠性 $R_i(t)$ 和子模块控制系统的可靠性 $R_{CTL}(t)$ 共同决定,UFD的可靠性 $R_U(t)$ 由电磁斥力机构的可靠性 $R_B(t)$ 和系统控制驱动模块的可靠性 $R_{SCU}(t)$ 共同决定,其可靠性分布函数可分别表示为:

$$R_L(t) = R_i^2(t) R_{CTL}(t) = e^{-(2\lambda_i + \lambda_{CTL})t} = e^{-\lambda_L t} \quad (2)$$

$$R_U(t) = R_B^2(t) R_{SCU}(t) = e^{-(\lambda_B + \lambda_{SCU})t} = e^{-\lambda_U t} \quad (3)$$

式中: λ_i 、 λ_{CTL} 分别为IGBT、子模块控制系统的故障率; λ_B 、 λ_{SCU} 分别为电磁斥力机构、系统控制驱动模块的故障率; λ_L 、 λ_U 分别为单个LCS、单个UFD的故障率。

假设桥臂1、4模块中LCS与UFD的冗余配置均采用串联方式,则串联LCS的故障率 λ_L 与串联UFD的故障率 λ_U 可分别表示为:

$$\lambda_L = \lambda_L^{1+i_i} \quad i_i \in [0, N_{OL}] \quad (4)$$

$$\lambda_U = \lambda_U^{1+i_u} \quad i_u \in [0, N_{OU}] \quad (5)$$

式中: i_i 、 i_u 分别为LCS、UFD损坏的数量; N_{OL} 、 N_{OU} 分别为LCS、UFD的冗余组数。

桥臂1、4的马尔可夫方程如附录A式(A1)所示,可求解得到桥臂1、4各状态的发生概率 $P_j^{14}(t)$ ($j=0,1,2$), $P_0^{14}(t)$ 为桥臂1、4正常运行的概率, $P_1^{14}(t)$ 为桥臂1、4中LCS发生故障的概率, $P_2^{14}(t)$ 为桥臂1、4中UFD发生故障的概率,其中 $P_0^{14}(t)$ 即为桥臂1、4的可靠性。

2)桥臂2、3。

桥臂2、3上串联了大量的电力电子器件,如图A4(b)所示,将晶闸管与二极管反并联的结构看作SD模块,IGBT与二极管反并联的结构看作ID模块,SD模块与ID模块串联组成桥臂2、3。SD模块的可靠性 $R_{SD}(t)$ 与ID模块的可靠性 $R_{ID}(t)$ 可以分别表示为:

$$R_{SD}(t) = e^{-(\lambda_s + \lambda_v + \lambda_{cn})t} = e^{-\lambda_{sd}t} \quad (6)$$

$$R_{ID}(t) = e^{-(\lambda_i + \lambda_{cn})t} = e^{-\lambda_{id}t} \quad (7)$$

式中: λ_s 、 λ_v 分别为晶闸管、二极管的故障率; λ_{sd} 、 λ_{id} 分别为单个SD模块、单个ID模块的故障率。

与桥臂1、4的马尔可夫模型类似,桥臂2、3的马尔可夫状态转移图如附录A图A5所示。当采取串联冗余配置时,SD模块的故障率 λ_s 与ID模块的故障率 λ_d 可分别表示为:

$$\lambda_s = \lambda_{sd}^{1+i_s} \quad i_s \in [0, N_{os}] \quad (8)$$

$$\lambda_d = \lambda_{id}^{1+i_i} \quad i_i \in [0, N_{oi}] \quad (9)$$

式中: i_s 、 i_i 分别为SD模块、ID模块损坏的数量; N_{os} 、 N_{oi} 分别为SD模块、ID模块的冗余数量。

桥臂2、3的马尔可夫方程如附录A式(A2)所示,可求解得到桥臂2、3各状态的发生概率 $P_j^{23}(t)$ ($j=0,1,2$), $P_0^{23}(t)$ 为桥臂2、3正常运行的概率, $P_1^{23}(t)$ 为桥臂2、3中SD模块发生故障的概率, $P_2^{23}(t)$ 为桥臂2、3中ID模块发生故障的概率。

2.3 HBSM的可靠性建模

串联HBSM的原理图^[19]如附录A图A6所示,每个HBSM的可靠性由IGBT、二极管、子模块电容、均压电阻、子模块控制系统共同决定,HBSM的可靠性分布函数 $R_{HB}(t)$ 可表示为:

$$R_{HB}(t) = R_1^2(t) R_C(t) R_R(t) R_{CTL}(t) = e^{-(2\lambda_1 + \lambda_C + \lambda_R + \lambda_{CTL})t} \quad (10)$$

式中: λ_C 、 λ_R 分别为子模块电容、均压电阻的故障率; $R_C(t)$ 、 $R_R(t)$ 分别为 t 时刻子模块电容、均压电阻的可靠性。

2.4 EFB-MMC的可靠性建模

考虑不同的任务剖面以及非工作故障的延续性,对EFB阀段的可靠性建模做如下假设:①EFB阀段中嵌套桥臂的切换仅在换流器所连线路发生直流故障时以及故障修复后换流器的恢复过程中进行;②各任务剖面仅考虑2.1节所述的阶段 MP_1 — MP_4 ;③为了简化模型,假设各元件的故障修复时间相同,均为换流器的故障修复时间 μ ,并且大于直流线路的故障修复时间,即EFB-MMC中任一元件修复后均处于阶段 MP_1 ;④不考虑定期巡检。

基于以上假设,建立EFB-MMC的10状态马尔可夫模型,如图3所示。图中:①—⑩表示10种状态的状态序号; p^j 、 p^i 分别为状态 i 向状态 j 、 i 转移所涉及的故障率,具体表达式见附录A式(A3)。

换流器所连直流线路的故障率、修复率分别为 λ_{Ldc} 、 μ_{Ldc} 。设备 x 的修复率 μ_x 的计算公式为:

$$\mu_x = \frac{8760}{\sum r_x \lambda_x / \sum \lambda_x} \quad (11)$$

式中: r_x 为设备 x 的故障修复时间; λ_x 为设备 x 的故障率。由于受到温度、环境、元件质量等级的影响,元件的工作故障率与非工作故障率有差异性,分别用 λ_x 、 λ'_x 表示设备 x 的工作故障率、非工作故障率。

根据图3得到EFB-MMC马尔可夫模型的转移概率矩阵 $P(t)$,如式(12)所示,其具体表达式见附录A式(A4)。

$$P(t) = \begin{bmatrix} P_{1,1}(t) & P_{1,2}(t) & \cdots & P_{1,10}(t) \\ P_{2,1}(t) & P_{2,2}(t) & \cdots & P_{2,10}(t) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{10,1}(t) & P_{10,2}(t) & \cdots & P_{10,10}(t) \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: $P_{i,j}(t)$ ($i=1,2,\dots,10$; $j=1,2,\dots,10$)为 t 时刻

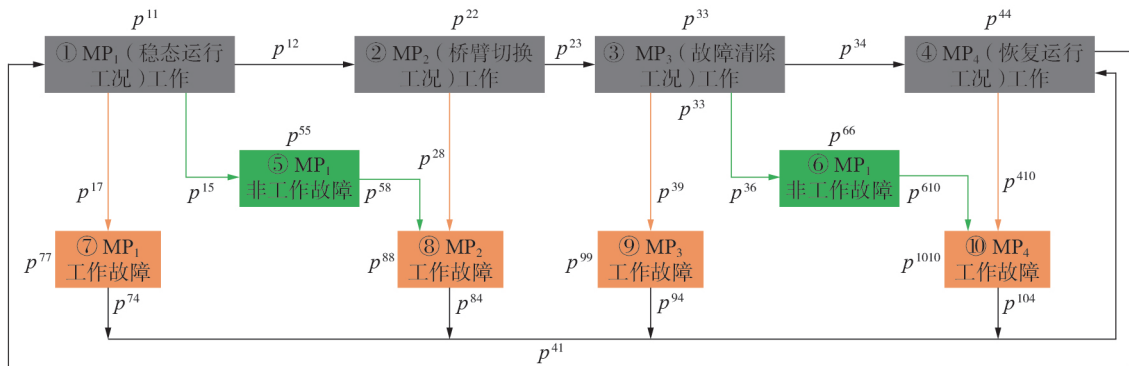


图3 EFB-MMC的10状态马尔可夫模型

Fig.3 Ten-state Markov model of EFB-MMC

状态 i 向状态 j 转移的概率。

根据马尔可夫过程的逼近原则,求得系数矩阵 A ,如式(13)和附录A式(A5)所示。

$$A = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{P(t) - I}{t} \quad (13)$$

式中: I 为单位矩阵。假设各状态发生的概率为 P_i ($i=1, 2, \dots, 10$),所有状态发生的概率之和为1,则可建立如下线性方程组:

$$[P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4 \ P_5 \ P_6 \ P_7 \ P_8 \ P_9 \ P_{10}]A=0 \quad (14)$$

$$P_1+P_2+P_3+P_4+P_5+P_6+P_7+P_8+P_9+P_{10}=1 \quad (15)$$

联立式(12)~(15)可求得 EFB-MMC 各状态的平稳运行状态概率,得到其可靠性 R_{EFB} 。

2.5 EFB-MMC 的冗余配置

假设 HBSM_E 的冗余数量为 N_{OE} ,损坏数量为 i_{E} ,HBSM_H 的冗余数量为 N_{OH} ,损坏数量为 i_{H} 。当 $i_{\text{E}} \leq N_{\text{OE}}$ 、 $i_{\text{H}} \leq N_{\text{OH}}$ 时,HBSM_E 的可靠性 $R_{\text{E}}(t)$ 、HBSM_H 的可靠性 $R_{\text{H}}(t)$ 可分别表示为:

$$R_{\text{E}}(t) = \sum_{i_{\text{E}}=0}^{N_{\text{OE}}} C_{N_{\text{E}}+N_{\text{OE}}}^{i_{\text{E}}} (1-R_{\text{HB}}(t))^{i_{\text{E}}} R_{\text{HB}}^{N_{\text{E}}+N_{\text{OE}}-i_{\text{E}}}(t) \quad (16)$$

$$R_{\text{H}}(t) = \sum_{i_{\text{H}}=0}^{N_{\text{OH}}} C_{N_{\text{H}}+N_{\text{OH}}}^{i_{\text{H}}} (1-R_{\text{HB}}(t))^{i_{\text{H}}} R_{\text{HB}}^{N_{\text{H}}+N_{\text{OH}}-i_{\text{H}}}(t) \quad (17)$$

式中: N_{E} 为 HBSM_E 的总数; N_{H} 为 HBSM_H 的总数。

基于2.4节的多剖面模型计算 EFB-MMC 的可靠性 R_{EFB} ,建立 R_{EFB} 随 N_{OE} 、 N_{OH} 变化的可靠性矩阵,计算 R_{EFB} 的一阶向后差分, N_{OE} 、 N_{OH} 的一阶差分矩阵的第 i 行第 j 列元素 $D_{\text{E}}(i, j)$ 、 $D_{\text{H}}(i, j)$ 分别为:

$$\begin{cases} D_{\text{E}}(i, j) = R_{\text{EFB}}(t) \Big|_{N_{\text{OE}}=i+1, N_{\text{OH}}=j} - R_{\text{EFB}}(t) \Big|_{N_{\text{OE}}=i, N_{\text{OH}}=j} \\ D_{\text{H}}(i, j) = R_{\text{EFB}}(t) \Big|_{N_{\text{OE}}=i, N_{\text{OH}}=j+1} - R_{\text{EFB}}(t) \Big|_{N_{\text{OE}}=i, N_{\text{OH}}=j} \end{cases} \quad (18)$$

被嵌套的 HBSM_E 与未被嵌套的 HBSM_H 的成本约束条件如式(19)所示。

$$n_1 N_{\text{OH}} + n_2 N_{\text{OE}} \leq P_{\text{E}} \quad (19)$$

式中: P_{E} 为子模块的目标成本; n_1 、 n_2 为子模块的成本等效系数, n_1 、 n_2 的物理含义分别表示在 EFB-MMC 中配置 HBSM_H、HBSM_E 冗余子模块时,每个新增 IGBT 元件对可靠性提升的贡献。

等微增率方法在子模块成本约束条件下的表达式如附录A式(A6)所示,其表示在满足 MMC 可靠性约束的条件下,为了使子模块成本最低,应当按照相等的成本微增率来配置子模块的冗余数量,直到满足可靠性约束条件的下限为止。

3 算例验证

假设 EFB-MMC 的直流电压为 400 kV,单个子模块的电容电压为 2 kV,当不计冗余时,每个桥臂需要配置的初始 HBSM 个数为 200。本文将被嵌套的 HBSM 与未被嵌套的 HBSM 个数设置为 1:1,即初始 $N_{\text{E}}=100$, $N_{\text{H}}=100$,能够保证 EFB-MMC 具备直流故障

穿越能力。直流线路的故障率 $\lambda_{\text{L}}=1.1602$ 次/a,修复率 $\mu_{\text{L}}=1249.95$ 次/a^[17]。为了简化计算,假设换流器中各部分器件的故障修复时间相同,为 7 h/次,由式(11)可计算得到单独换流器的故障修复率 $\mu_{\text{M}}=1251$ 次/a。分别计算各模块在工作状态与非工作状态时的故障率^[20-21],如附录A表A1所示。

3.1 嵌套桥臂的可靠性建模及冗余配置方案

本节基于2.3节所建立的工作状态故障时桥臂 1、4 的马尔可夫可靠性模型,考虑到 UFD 的成本高昂,且在桥臂 1、4 中起主要承压作用,因此取 UFD、LCS 的冗余个数范围分别为 $N_{\text{OU}} \in [0, 2]$ 、 $N_{\text{OL}} \in [0, 10]$,桥臂 1、4 的可靠性 R_{14} 随 N_{OU} 与 N_{OL} 变化的部分数据如附录A表A2所示。

由表A2可知,与 N_{OL} 相比, R_{14} 随 N_{OU} 增大而增大的趋势更加明显,但是考虑到 UFD 成本为 LCS 成本的几十倍,增大 N_{OU} 会使经济性大幅降低, $N_{\text{OU}}=1$ 且 $N_{\text{OL}}=4$ 时的可靠性与 $N_{\text{OU}}=2$ 且 $N_{\text{OL}}=2$ 时的可靠性相近,因此可以通过增加 LCS 的冗余来提高桥臂 1、4 的可靠性。本文选择 $N_{\text{OU}}=1$ 、 $N_{\text{OL}}=4$ 的配置方案,此时桥臂 1、4 在工作状态的故障率 $\lambda_{14}=0.0027$,在非工作状态的故障率 $\lambda'_{14}=0.0016$ 。

同样建立桥臂 2、3 的马尔可夫可靠性模型,在桥臂 2、3 中,IGBT 起开关作用,晶闸管与二极管为主要承压元件,初始配置 ID 模块个数 $N_{\text{I}}=1$ 、SD 模块个数 $N_{\text{S}}=92$ 可满足电压需求,取 SD 模块、ID 模块的冗余个数范围分别为 $N_{\text{OS}} \in [0, 10]$ 、 $N_{\text{OI}} \in [0, 10]$,桥臂 2、3 的可靠性 R_{23} 随 N_{OS} 、 N_{OI} 变化的部分数据如附录A表A3所示。

由表A3可知,与 N_{OI} 相比,桥臂 2、3 的可靠性 R_{23} 随 N_{OS} 增大而增大的趋势更加明显,但是由桥臂 2、3 的功能可知, EFB 阀段桥臂顺利翻转的关键在于 IGBT 模块能够正常开断,因此在满足可靠性的条件下仍以配置 ID 模块为先,因此本文选择 $N_{\text{OS}}=2$ 、 $N_{\text{OI}}=3$ 的配置方案,此时桥臂 2、3 在工作状态的故障率 $\lambda_{23}=0.00003$,在非工作状态的故障率 $\lambda'_{23}=0.0000072$ 。

3.2 EFB-MMC 的可靠性建模及冗余配置方案

对于 HBSM_E 与 HBSM_H 的可靠性建模,假设换流器已运行至第 8 年,取 HBSM_E、HBSM_H 的冗余个数范围分别为 $N_{\text{OE}} \in [0, 20]$ 、 $N_{\text{OH}} \in [0, 20]$,根据式(16)和式(17)可得 HBSM_E 的可靠性 R_{E} 、HBSM_H 的可靠性 R_{H} 随冗余个数的变化曲线,如附录A图A7所示。

以 $N_{\text{OE}}=N_{\text{OH}}=12$ 以及 $R_{\text{E}}=R_{\text{H}}=0.9947$ 为例,此时 HBSM_E、HBSM_H 的故障率 $\lambda_{\text{E}}=\lambda_{\text{H}}=0.0053$,计算 EFB-MMC 的马尔可夫模型。考虑不同的任务剖面及非工作故障延续性,将附录A表A4中的数据代入式(A3),可得各状态的可靠性指标,如表1所示。表中: f_i 为状态 i 的频率; d_i 为状态 i 的持续时间。

由表1可知,当 $N_{\text{OE}}=N_{\text{OH}}=12$ 时, EFB-MMC 可靠

表1 EFB-MMC各状态的可靠性指标
Table 1 Reliability indexes of EFB-MMC
under each state

状态	P_i	$f_i / (\text{次} \cdot \text{a}^{-1})$	d_i / a
正常运行	状态1	0.99791	1.25357
	状态2	$1.25257 \times 10^{-\infty}$	1.25257
	状态3	1.00208×10^{-4}	0.04849
	状态4	$1.26357 \times 10^{-\infty}$	1.26357
非工作故障	状态5	9.54022×10^{-5}	1.19749×10^{-4}
	状态6	3.72719×10^{-7}	4.65881×10^{-4}
工作故障	状态7	1.09137×10^{-5}	0.01365
	状态8	9.57231×10^{-8}	1.19748×10^{-4}
	状态9	9.85742×10^{-4}	1.23316
	状态10	3.72410×10^{-7}	7.20905×10^{-9}

性 $R_{\text{EFB}}=0.99791$ 。而现有可靠性模型计算所得EFB-MMC的可靠性为0.98864,可见本文模型计算所得可靠性明显高于现有模型计算所得结果,这主要是因为本文模型考虑计算了EFB-MMC的不同运行状态,使得解的可靠性指标更符合实际运行情况,而现有模型仅通过各元件的串并联关系建立可靠性模型,计算结果偏离了实际。

将HBSM_E、HBSM_H的不同冗余个数分别代入10状态马尔可夫模型进行求解,得到EFB-MMC可靠性随HBSM_E、HBSM冗余个数的变化曲线,如附录A图A8所示。由图可知,当冗余个数增长到一定的数值时,每个新增的HBSM_H、HBSM_E对可靠性的贡献将会趋于饱和,且增加HBSM的冗余个数会降低系统的经济性,因此需要考虑成本约束。本文近似认为子模块的成本由核心器件IGBT模块与电容决定,而电容的成本与IGBT模块的成本近似,因此1个HBSM的成本可以近似等效为3个IGBT模块的成本,故式(19)中的 $n_1=n_2=3$,成本约束表达式如式(20)所示。

$$3N_{\text{OH}}+3N_{\text{OE}}=P_{\text{E}} \quad (20)$$

本节取 $P_{\text{E}}=50$,即冗余子模块的成本不大于50个IGBT模块的成本,构造拉格朗日函数 C_1 如式(21)所示。

$$C_1=R_{\text{EFB}}-n^*(3N_{\text{OH}}+3N_{\text{OE}}-50) \quad (21)$$

式中: n^* 为成本算子。令拉格朗日函数对 N_{OH} 、 N_{OE} 的一阶偏导数等于0,以EFB-MMC可靠性矩阵的差分代替微增率,化简结果如附录A式(A7)所示。

由于冗余子模块个数的增加对MMC可靠性的提升作用呈现先增加后降低的趋势,当冗余子模块个数超过一定的数值时,不仅对可靠性的提升作用减小,还会增加子模块成本。HBSM成本随冗余个数的变化曲线如附录A图A9所示。

n_1 和 n_2 反映了配置HBSM_H与HBSM_E时,新增HBSM对可靠性提升作用的大小,为了更直观地观察冗余个数对可靠性的贡献,作出 $\Delta n=n_2-n_1$ 与 N_{OH} 、

N_{OE} 的变化关系,如图4所示。

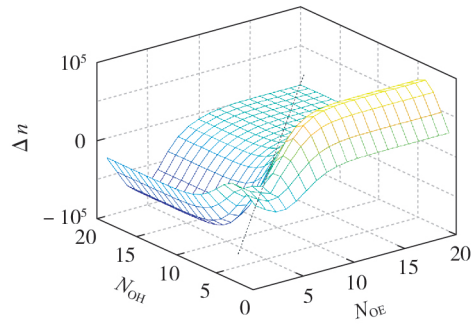


图4 Δn 随 N_{OH} 、 N_{OE} 的变化关系
Fig.4 Change of Δn vs. N_{OH} and N_{OE}

比较 Δn 与0(图4中的灰色虚线)的大小关系即可确定基于等可靠性微增率准则的最优冗余配置方案。对于EFB-MMC,当冗余子模块总数一定时,配置相同冗余个数的HBSM_H、HBSM_E时可靠性最高。在成本约束为50个IGBT模块成本的条件下,子模块冗余配置方案为 $N_{\text{OE}}=8$ 、 $N_{\text{OH}}=8$,此时EFB-MMC的可靠性为0.99782。MMC的可靠性需高于99.5%^[22],因此该冗余配置方案下的换流站可靠性是满足要求的。

4 结论

本文针对异构型MMC提出了一种通用可靠性建模方法,并以EFB-MMC为例进行计算,所得结论如下。

1)异构型MMC具有2个共性特征:①MMC呈现多模态化,且不局限于子模块结构的改变;②故障后的运行方式涉及支路投切。异构型MMC发生故障后通过投切相应的支路,使得换流站输出负电压,或是转移故障电流,起到降低阀侧电压的目的。

2)异构型MMC的可靠性建模需根据运行原理分析不同支路中元件的故障连续性,基于不同运行工况下的电流通路建立多状态马尔可夫模型,计算各工作状态的概率。

3)以EFB-MMC为例,根据嵌套桥臂的切换原理,将其划分为4个任务剖面,建立10状态空间转移模型。综合考虑冗余模块的经济性与可靠性的提升作用,桥臂1、4优先配置LCS,桥臂2、3优先配置ID模块,当HBSM_E与HBSM_H冗余个数相等时对可靠性的贡献度最大,当冗余子模块数量8个时,可靠性达到0.99782。

本文所提多任务剖面可靠性分析方法不只局限于EFB-MMC,对于其他在运行过程中涉及电路拓扑改变及支路切换的异构型MMC仍适用。该方法能够反映异构型MMC实现多个功能的综合可靠性,具有较强的通用性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] WANG H, BLAABJERG F. Reliability of capacitors for DC-link applications in power electronic converters-an overview[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(5): 3569-3578.
- [2] TANG G, XU Z, ZHOU Y Z. Impacts of three MMC-HVDC configurations on AC system stability under DC line faults[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 3030-3040.
- [3] 李辉, 邓吉利, 姚然, 等. 计及运行工况的MMC换流阀可靠性建模与分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 108-114.
LI Hui, DENG Jili, YAO Ran, et al. Reliability modeling and analysis of MMC converter valve considering operation conditions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 108-114.
- [4] 王朝亮, 赵成勇, 许建中. 模块化多电平换流器的子模块冗余配置计算方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 103-107.
WANG Chaoliang, ZHAO Chengyong, XU Jianzhong. A method for calculating sub-module redundancy configurations in modular multilevel converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 103-107.
- [5] XU J Z, ZHAO P H, ZHAO C Y. Reliability analysis and redundancy configuration of MMC with hybrid submodule topologies[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(4): 2720-2729.
- [6] ZHAO Xibei, DING Jiangping, XU Jianzhong, et al. The auxiliary full-bridge converter based hybrid MMC with low voltage operation and DC fault ride-through capabilities[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 8(3): 864-871.
- [7] 王琛, 陶建业, 王毅, 等. 半桥-全桥子模块混合型桥臂复用MMC的拓扑及故障穿越策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(22): 8297-8309.
WANG Chen, TAO Jianye, WANG Yi, et al. Research on topology and fault ride-through strategy of hybrid arm multiplexing MMC composed of HBSMs and FBSMs[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(22): 8297-8309.
- [8] 赵成勇, 李帅, 张继元, 等. 适用于直流电网故障清除的增强型MMC[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 60-67.
ZHAO Chengyong, LI Shuai, ZHANG Jiyuan, et al. An augmented modular multilevel converter for clearing fault in DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 60-67.
- [9] 宋强, 杨文博, 李笑倩, 等. 集成直流断路器功能的模块化多电平换流器[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 6004-6013.
SONG Qiang, YANG Wenbo, LI Xiaoqian, et al. An MMC topology integrated with DC circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 6004-6013.
- [10] WANG B Y, WANG X F, BIE Z H, et al. Reliability model of MMC considering periodic preventive maintenance[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1535-1544.
- [11] TU P F, YANG S F, WANG P. Reliability- and cost-based redundancy design for modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3): 2333-2342.
- [12] ABEYNAYAKE G, LI G, JOSEPH T, et al. Reliability and cost-oriented analysis, comparison and selection of multi-level MVDC converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(6): 3945-3955.
- [13] XIE X J, LI H, MCDONALD A, et al. Reliability modeling and analysis of hybrid MMCs under different redundancy schemes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(3): 1390-1400.
- [14] 束洪春, 王文韬, 江耀曦, 等. 一种具备直流故障清除能力的新MMC子模块拓扑[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(5): 75-81.
SHU Hongchun, WANG Wentao, JIANG Yaoxi, et al. Novel MMC sub-module topology with DC fault clearing capability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(5): 75-81.
- [15] 蒋烨, 赵争鸣, 施博辰, 等. 功率开关器件多时间尺度瞬态模型(II): 应用分析与模型互联[J]. 电工技术学报, 2017, 32(12): 25-32.
JIANG Ye, ZHAO Zhengming, SHI Bochen, et al. Multi-time scale transient models for power semiconductor devices (part II: applications analysis and model connection)[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(12): 25-32.
- [16] 束洪春, 董海飞, 赵红芳, 等. ± 800 kV 柔直换流站电气系统可靠性分析[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(2): 119-126.
SHU Hongchun, DONG Haifei, ZHAO Hongfang, et al. Reliability analysis of electrical system in ± 800 kV VSC-DC converter station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(2): 119-126.
- [17] 王天霖, 杨墨缘, 高崇, 等. 多端口直流断路器可靠性评估模型及其应用[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(12): 212-218, 224.
WANG Tianlin, YANG Moyuan, GAO Chong, et al. Reliability evaluation model of multi-terminal DC circuit breaker and its application[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12): 212-218, 224.
- [18] 杨墨缘, 欧阳森, 张真, 等. 考虑多任务剖面及其非工作故障延续性的直流断路器可靠性模型[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(12): 136-144.
YANG Moyuan, OUYANG Sen, ZHANG Zhen, et al. Reliability model of DC circuit breaker considering multi mission profiles and its non-operating fault continuity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(12): 136-144.
- [19] 许建中, 王乐, 井皓, 等. 混合MMC等微增率子模块冗余配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5804-5811, 5937.
XU Jianzhong, WANG Le, JING Hao, et al. Equal incremental principle based sub-module redundancy configuration of hybrid MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5804-5811, 5937.
- [20] 中国人民解放军总装备部. 电子设备可靠性预计手册: GJB/Z 2573—1996[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2006.
- [21] NELSON W. An application of graphical analysis of repair data[J]. Quality & Reliability Engineering International, 2015, 14(1): 49-52.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高压直流换流站设计规范: GB/T 51200—2016[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.

作者简介:

朱雯清(1999—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性直流输电技术(E-mail: wenqingzhu0522@163.com);
赵西贝(1993—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为直流电网运行与保护(E-mail: xzbzhao@163.com);
熊岩(1991—), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为柔性直流输电技术(E-mail: xiongyan@csg.cn);
周月宾(1987—), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为柔性直流输电(E-mail: zhouyib@csg.cn);
赵成勇(1964—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为直流输电(E-mail: chengyongzhao2@163.com)。

(编辑 陆丹)

Multi-mission profile reliability analysis method for heterogeneous converter

ZHU Wenqing¹, ZHAO Xibei¹, XIONG Yan², ZHOU Yuebin², ZHAO Chengyong¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Key Laboratory of HVDC, Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid,
Guangzhou 510663, China)

Abstract: Most existing studies on the reliability analysis of modular multi-level converter(MMC) focus on the converters with independent sub-module structures. However, there is still a lack of effective reliability analysis methods for heterogeneous topologies with low-cost and multi-mode. Therefore, the reliability analysis of heterogeneous converter is of great significance to extend its application boundary. The characteristics of heterogeneous MMC are summarized. Taking the embedded full-bridge MMC(EFB-MMC) as an example, a reliability modeling method suitable for heterogeneous MMC is proposed, which considers the multi-mission profile and the continuity of working state failure caused by bridge switching. By analyzing the different operating states of the converter, the Markov model is established and its redundancy configuration scheme is analyzed. Based on the simulation example, the reliability of EFB-MMC is calculated, and the influence of the redundant configuration of sub-modules on its reliability is analyzed. Compared with the traditional models, it is verified that the proposed method can provide a strategic reference for the reliability analysis and redundancy configuration of the heterogeneous MMC with multi-switch state.

Key words: modular multi-level converter; reliability analysis; Markov model; multi-mission profile

(上接第61页 continued from page 61)

Stability analysis of photovoltaic DC microgrid based on virtual inertia control

WANG Jiaqian¹, ZHAO Jinbin², ZENG Zhiwei¹, MAO Ling¹, QU Keqing¹

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Offshore Wind Power Research Institute, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Under the goal of “double carbon”, DC microgrid show low inertia characteristics, which adversely affects the stable operation of the system. A negative feedback model based on the bus node conductor network is established, and its equivalent open-loop function is used to analyze the system stability. Aiming at the lack of system stability margin, it is proposed to introduce the virtual inertia control into the photovoltaic unit, which realizes the smooth output of bus voltage under the situation of large light intensity variation. Theoretical analysis and experimental results show that the proposed control method is effective in suppressing the bus voltage fluctuation on the basis of ensuring the photovoltaic utilization rate.

Key words: DC microgrid; bus node conduction network; small disturbance stability; virtual inertia control

附录 A

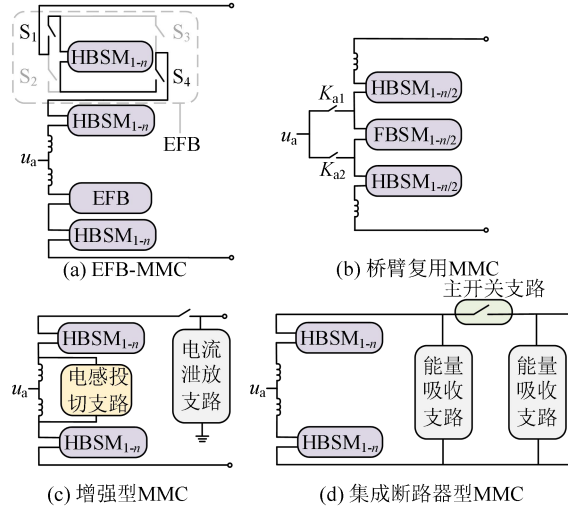


图 A1 异构型 MMC 拓扑

Fig.A1 Topology of heterogeneous MMC

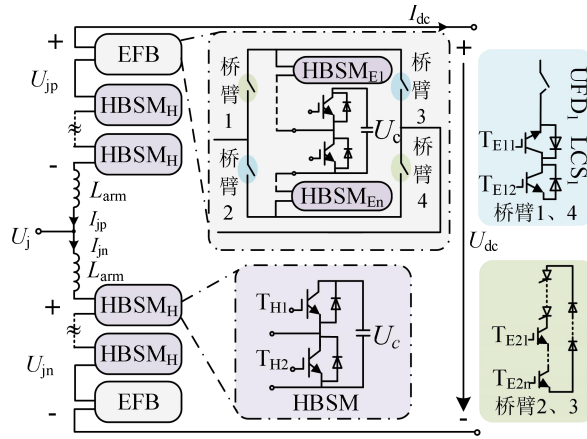


Fig.A2 Topology of EFB-MMC

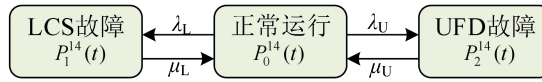


Fig.A3 Markov state transition diagram of Bridge 1 and Bridge 4

图中： λ_U 、 λ_L 分别为 UFD 和 LCS 发生故障导致桥臂 1、4 故障的概率； μ_U 、 μ_L 分别为 UFD、LCS 的修复率； $P_1^{14}(t)$ 为桥臂 1、4 支路中 LCS 故障的概率； $P_0^{14}(t)$ 为桥臂 1、4 正常运行的概率； $P_2^{14}(t)$ 为桥臂 1、4 支路中 UFD 故障的概率。

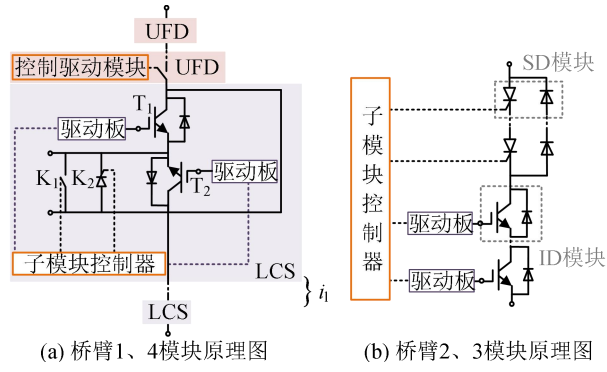


图 A4 桥臂模块原理图

Fig.A4 Schematic diagram of arm module

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} -\lambda_L - \lambda_U & \mu_L & \mu_U \\ \lambda_L & -\mu_L & 0 \\ \lambda_U & 0 & -\mu_U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0^{14}(t) \\ P_1^{14}(t) \\ P_2^{14}(t) \end{bmatrix} = 0 \\ P_0^{14}(t) + P_1^{14}(t) + P_2^{14}(t) = 0 \end{cases} \quad (A1)$$

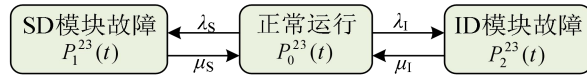


图 A5 桥臂 2、3 模块马尔可夫状态转移图

Fig.A5 Markov state transition diagram of Bridge 2 and Bridge 3

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} -\lambda_S - \lambda_I & \mu_S & \mu_I \\ \lambda_S & -\mu_S & 0 \\ \lambda_I & 0 & -\mu_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0^{23}(t) \\ P_1^{23}(t) \\ P_2^{23}(t) \end{bmatrix} = 0 \\ P_0^{23}(t) + P_1^{23}(t) + P_2^{23}(t) = 0 \end{cases} \quad (A2)$$

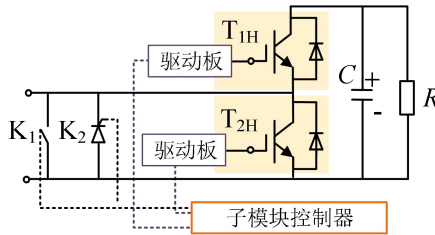


图 A6 HBSM 原理图

Fig.A6 Principle diagram of HBSM

$$\begin{cases}
p^{11} = 1 - (\lambda_{14} + \lambda'_{23} + \lambda_{E\&H} + \lambda_L)\Delta t \\
p^{12} = \lambda_L \Delta t, p^{17} = (\lambda_{23} + \lambda_{E\&H})\Delta t \\
p^{15} = \lambda'_{14} \Delta t, p^{23} = 1 - (\lambda_{14} + \lambda_{23} + \lambda_{E\&H} + \lambda_L)\Delta t \\
p^{28} = (\lambda_{14} + \lambda_{23} + \lambda_{E\&H})\Delta t \\
p^{33} = 1 - (\lambda_{14} + \lambda_{23} + \lambda_{E\&H} + \mu_L)\Delta t \\
p^{34} = \mu_L \Delta t, p^{36} = \lambda'_{23} \Delta t, p^{39} = \lambda_{14} \Delta t \\
p^{41} = 1 - (\lambda_{14} + \lambda_{23} + \lambda_{E\&H})\Delta t, p^{410} = (\lambda_{14} + \lambda_{23} + \lambda_{E\&H})\Delta t \\
p^{55} = 1 - \lambda_L \Delta t, p^{58} = \lambda_L \Delta t, p^{66} = 1 - \mu_L \Delta t \\
p^{610} = \mu_L \Delta t, p^{74} = p^{84} = p^{94} = p^{104} = \mu_M \Delta t \\
p^{77} = p^{88} = p^{99} = p^{1010} = 1 - \mu_M \Delta t
\end{cases} \quad (A3)$$

式中： λ_{14} 、 λ'_{14} 分别为桥臂 1 和桥臂 4 发生工作故障、非工作故障的概率； λ_{23} 、 λ'_{23} 分别为桥臂 2 和桥臂 3 发生工作故障、非工作故障的概率； $\lambda_{E\&H}$ 为 HBSM 发生工作故障的概率。

$$\mathbf{P}(\Delta t) = \begin{bmatrix}
1 - \lambda_L \Delta t - (\lambda_{23} + \lambda'_{14} + \lambda_E) \Delta t & \lambda_L \Delta t & 0 & 0 & \lambda'_{14} \Delta t & 0 & (\lambda_{23} + \lambda_E) \Delta t & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1 - (\lambda_{23} + \lambda_{14} + \lambda_E) \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & (\lambda_{23} + \lambda_{14} + \lambda_E) \Delta t & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1 - (\lambda'_{23} + \lambda_{14} + \lambda_E) \Delta t - \mu_L \Delta t & \mu_L \Delta t & 0 & 0 & \lambda'_{23} \Delta t & 0 & (\lambda_{14} + \lambda_E) \Delta t & 0 \\
1 - (\lambda_{23} + \lambda_{14} + \lambda_E) \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{14} \Delta t & 0 & 0 & 0 & (\lambda_{23} + \lambda_{14} + \lambda_E) \Delta t \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1 - \lambda_L \Delta t & 0 & 0 & \lambda_L \Delta t & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - \mu_L \Delta t & 0 & 0 & 0 & \mu_L \Delta t \\
0 & 0 & 0 & \mu_M \Delta t & 0 & 0 & 1 - \mu_M \Delta t & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & \mu_M \Delta t & 0 & 0 & 0 & 1 - \mu_M \Delta t & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & \mu_M \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - \mu_M \Delta t & 0 \\
0 & 0 & 0 & \mu_M \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - \mu_M \Delta t
\end{bmatrix} \quad (A4)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix}
-\lambda_L - (\lambda_{23} + \lambda'_{14} + \lambda_E) & \lambda_L & 0 & 0 & \lambda'_{14} & 0 & \lambda_{23} + \lambda_E & 0 & 0 & 0 \\
0 & -\text{Inf} & \text{Inf} - (\lambda_{23} + \lambda_{14} + \lambda_E) & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{23} + \lambda_{14} + \lambda_E & 0 & 0 \\
0 & 0 & -(\lambda'_{23} + \lambda_{14} + \lambda_E) - \mu_L & \mu_L & 0 & \lambda'_{23} & 0 & 0 & \lambda_{14} + \lambda_E & 0 \\
\text{Inf} - \lambda_{23} + \lambda_{14} + \lambda_E & 0 & 0 & -\text{Inf} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{23} + \lambda_{14} + \lambda_E \\
0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_L & 0 & 0 & \lambda_L & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_L & 0 & 0 & 0 & \mu_L \\
0 & 0 & 0 & \mu_M & 0 & 0 & -\mu_M & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & \mu_M & 0 & 0 & 0 & -\mu_M & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & \mu_M & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_M & 0 \\
0 & 0 & 0 & \mu_M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_M
\end{bmatrix} \quad (A5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial C_E}{\partial N_{OH}} = n_1 - \lambda_{p1} D_E = 0 \\ \frac{\partial C_H}{\partial N_{OH}} = n_2 - \lambda_{p2} D_H = 0 \\ \frac{\partial C_E}{\partial \lambda_p} = R(t_0) - R_{EFB} = 0 \end{array} \right. \quad (A6)$$

表 A1 各模块在工作状态与非工作状态的故障率

Table A1 Failure rate of each module under operating state and non operating state

模块	工作状态故障率/(次/a)	非工作状态故障率/(次/a)	修复率
LCS	0.008458	0.00012	0.127
UFD	0.0153	0.00041	0.25
SD 模块	0.004708	0.00063	0.236
ID 模块	0.004954	0.0006	0.357
HBSM	0.00456	0.00201	—

表 A2 R_{14} 随 N_{OU} 与 N_{OL} 变化规律

Table A2 R_{14} changing with N_{OU} and N_{OL}

$N_{OU}/\text{个}$	$N_{OL}/\text{个}$				
	0	1	2	3	4
0	0.9217	0.9334	0.9423	0.9462	0.9536
1	0.9623	0.9957	0.9959	0.9964	0.9973
2	0.9766	0.9967	0.9972	0.9985	0.9997

表 A3 R_{23} 随 N_{OS} 与 N_{OI} 变化规律

Table A3 R_{23} changing with N_{OS} and N_{OI}

$N_{OS}/\text{个}$	$N_{OI}/\text{个}$				
	0	1	2	3	4
0	0.966902	0.980231	0.984362	0.984957	0.985275
1	0.985916	0.999412	0.999541	0.999861	0.999962
2	0.986284	0.999807	0.999732	0.999970	0.999979
3	0.986301	0.999826	0.999980	0.999997	0.999999
4	0.986314	0.999846	0.999997	0.999999	0.999999

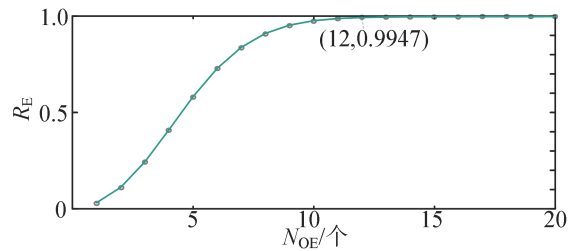


图 A7 R_E 与 R_H 随 N_{OE} 与 N_{OH} 的变化曲线

Fig. A7 R_E and R_H curves changing with N_{OE} and N_{OH}

表 A4 EFB-MMC 各模块故障率

Table A4 Component failure rate of EFB-MMC

模块	工作状态故障率/(次/a)	非工作状态故障率/(次/a)
桥臂 1、4 模块	0.008458	0.00012
桥臂 2、3 模块	0.00003	0.0000072
HBSM _E 模块	0.0053	—

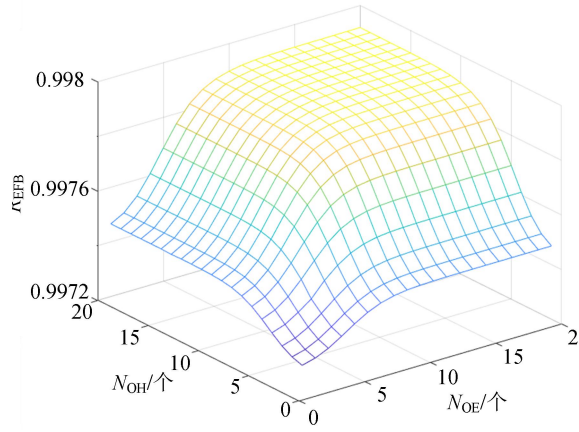
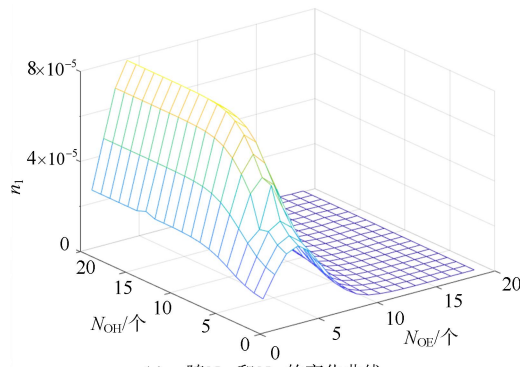


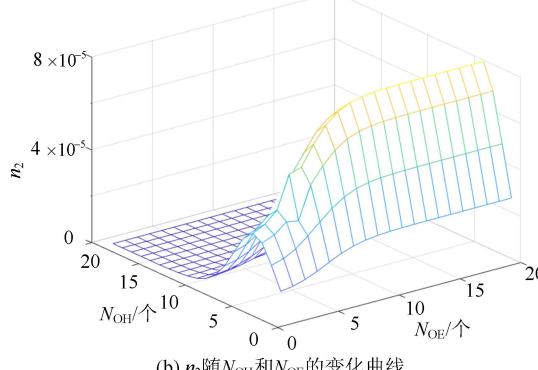
图 A8 EFB-MMC 可靠性随 N_{OE} 与 N_{OH} 的变化曲线

Fig. A8 Reliability of EFB-MMC changing with N_{OE} and N_{OH}

$$\begin{cases} n_1 = \frac{1}{3} \frac{\partial R_{\text{EFB-MMC}}}{\partial N_{OH}} = \frac{1}{3} D_H \\ n_2 = \frac{1}{3} \frac{\partial R_{\text{EFB-MMC}}}{\partial N_{OE}} = \frac{1}{3} D_E \\ 3N_{OH} + 3N_{OE} - 80 = 0 \end{cases} \quad (A7)$$



(a) n_1 随 N_{OH} 和 N_{OE} 的变化曲线



(b) n_2 随 N_{OH} 和 N_{OE} 的变化曲线

图 A9 HBSM 成本随冗余数量的变化曲线

Fig. A9 Curve of HBSM cost changing with quantity of redundancy