

基于 $k/n(G)$ 模型的 MMC 系统可靠性建模与分析

郑文迪^{1,2}, 许启东[†], 邵振国^{1,2}, 周腾龙³, 李怡馨¹, 曾祥勇¹

(1. 福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108; 2. 福建省电器智能化工程技术研究中心, 福建 福州 350108;
3. 中国能源建设集团 湖南省电力设计院有限公司, 湖南 长沙 410007)

摘要: 针对模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的可靠性分析通常忽略控制模块与子模块间的相关性, 首先基于子模块拓扑分析, 建立单个子模块与控制模块的可靠性模型; 然后考虑 MMC 同一桥臂各子模块以及控制模块使用寿命之间的相互影响, 依据 Copula 理论多变量联合概率分布函数构造方法, 选取符合特殊应用场景下的 Copula 函数; 其次考虑所有模块间相关性前提并结合 $k/n(G)$ 模型建立 MMC 可靠性分析模型; 最后以上海南汇柔性直流输电示范工程为例分析了运行年数、相关程度、必备子模块数量及冗余子模块数量不同情况下 MMC 可靠性的变化规律. 结果表明, 该模型能较好地满足 MMC 可靠性评估要求, 可为 MMC 拓扑设计和冗余配置提供必要的信息.

关键词: 模块化多电平换流器; Copula 理论; 相关性; $k/n(G)$ 模型; 可靠性分析

中图分类号: TM71

文献标志码: A

Reliability Modeling and Analysis of MMC System Based on $k/n(G)$ Model

ZHENG Wendi^{1,2}, XU Qidong[†], SHAO Zhenguo^{1,2},
ZHOU Tenglong¹, LI Yixin¹, ZENG Xiangyong¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Fujian Smart Electrical Engineering Technology Research Center, Fuzhou 350108, China;

3. Hunan Electric Power Design Institute Co.Ltd, China Energy Engineering Group, Changsha 410007, China)

Abstract: As the reliability analysis for modular multilevel converter (MMC) usually ignores the correlation between control module and submodules. Firstly, the reliability model of single submodule (SM) and control module is established based on submodule topology analysis. Secondly, considering the interaction of the service life between the SMs and control module, this paper selects the Copula function in accordance with the special application scenario according to the construction method of Copula theory multi-variable joint probability distribution function. Thirdly, taking into account the premise of the correlation of all modules, the MMC reliability analysis model is established with redundant configuration based on $k/n(G)$ model. Finally, taking the flexible DC transmission project in Nanhui Shanghai as an example, the variation law of MMC reliability under different conditions of operation years, correlation degree, requisite SM count and redundant SM count are analyzed. The results show that the model can

* 收稿日期:2019-12-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777035), National Natural Science Foundation of China(51777035); 福建省自然科学基金资助项目(2017J01480), Natural Science Foundation of Fujian Province of China(2017J01480)

作者简介:郑文迪(1984—),男,福建福州人,福州大学讲师,硕士生导师

† 通讯联系人, E-mail: xqd19950121@163.com

meet the MMC reliability assessment requirements better and provide the necessary information for MMC topology design and redundancy configuration.

Key words: modular multilevel converter; copula theory; correlation; $k/n(G)$ model; reliability analysis

模块化多电平换流器 (modular multilevel converter, MMC) 自提出以来便受到了国内外学者广泛的关注^[1-3], 目前对 MMC 的研究主要围绕子模块 (submodule, SM) 拓扑结构^[4]、控制策略^[5]和调制策略^[6]及谐波抑制^[7]等方面展开。此外, 可靠性也是 MMC 系统设计和运行时需要考虑的关键因素^[8]。为了提高 MMC 可靠性, 在实际工程中通常会进行冗余配置^[9]。因此, 有必要对配置冗余子模块的 MMC 系统进行可靠性分析。目前已有相关学者对 MMC 可靠性展开相关研究。丁明等基于 $k/n(G)$ 模型, 建立了两电平电压源换流器的可靠性模型, 计算了不同电压等级和不同冗余度下的换流阀可靠性指标, 并以可靠性指标配置换流阀模块最优冗余数目^[10]。许建中等提出了基于经典概率理论的具有故障穿越能力的混合 MMC 的可靠性模型, 并基于该模型对三维曲面进行一阶差分, 求解出不同子模块拓扑结构的 MMC 冗余配置比^[11]。郭静丽等建立了子模块处于寿命曲线的稳定运行期的可靠性模型, 并分别从故障率、电压水平、电压偏差三个角度对 MMC 进行综合性能评估^[12]。然而上述文献都是在各子模块、控制模块可靠性完全独立条件下进行的 MMC 可靠性分析, 未考虑同一桥臂中各模块间存在的相关特征。而文献[13]通过仿真实验验证了某些子模块发生故障时, 同一桥臂上其余子模块的电容电压纹波幅值均受到了不同程度的影响; 文献[14]进一步指出, 相间环流会流经同一桥臂所有的子模块, 子模块的工作状态具有一定的相关性。文献[15-16]假设各子模块间存在相关性, 基于 Copula 理论建立了 MMC 可靠性模型, 并在模型基础上计算了 MMC 桥臂可靠性。但其主要存在以下两点不足: 第一, 该方法虽考虑了各子模块间的相关性, 但未能给出子模块间的相关系数的确定方法; 第二, 未考虑桥臂控制模块与各子模块之间的相关性的研究。文献[17]中明确指出, 不同工况下热备用控制策略中算法时间复杂度及空间复杂度不同, 导致了相间环流、子模块电容电压波动幅值减小的程度也不尽相同。此外, 不同容错控制策略的算法计算量不同, 也会导致相应子模块投入时间有所不同, 所以,

子模块出现故障时会导致其他电容电压纹波出现不同程度变化^[18]。总而言之, 不同的控制策略会导致各个子模块的纹波电压有不同程度的变化。因此, 同一桥臂各个子模块及控制模块之间并不是严格独立的, 忽略 MMC 各模块间相关性, 一定程度上会影响实际工程 MMC-HVDC 系统的可靠性分析计算结果。

针对上述不足, 本文首先在 MMC 拓扑结构基础上建立各元件的可靠性模型, 充分考虑各个模块间的相关性, 并通过极大似然估计法得到相关系数; 基于 $k/n(G)$ 模型建立 MMC 可靠性分析模型, 进一步讨论在运行年数、相关系数和子模块数量不同时 MMC 可靠性变化规律; 最后, 通过算例分析, 得到 MMC 可靠性设计和优化的方案。MMC 可靠性建模与分析流程如图 1 所示。

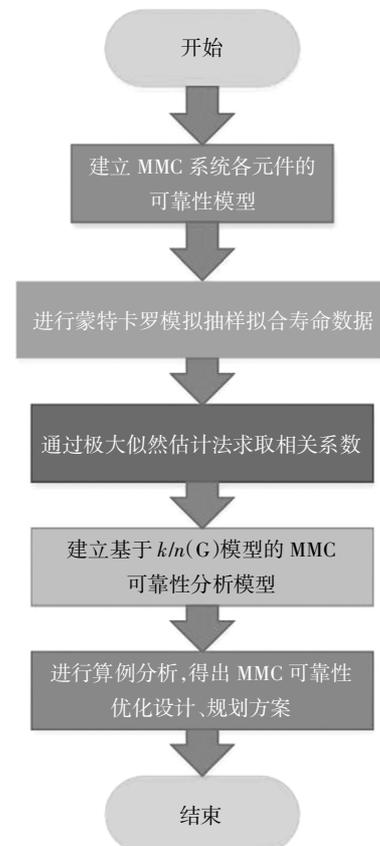


图 1 可靠性建模与分析方法流程图

Fig.1 Flow diagram of reliability modeling and analysis method

1 MMC 结构

1.1 MMC 拓扑结构

MMC 上、下桥臂分别由 N 个必备子模块和 N_0 个冗余子模块级联构成,如图 2 所示为直流侧电压, O 为直流侧零电位参考点. 目前实际工程应用中,子模块通常采用半桥结构^[9],故本文选用半桥结构进行可靠性分析.

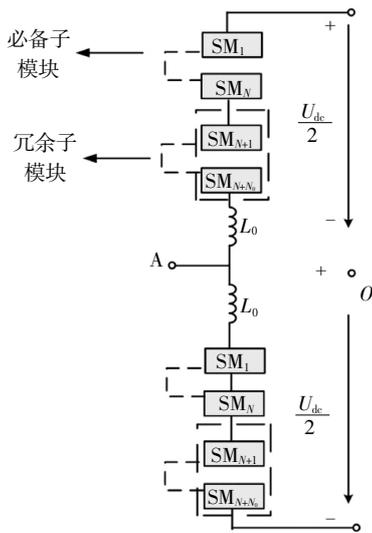


图 2 MMC 拓扑结构

Fig.2 Configuration of MMC

1.2 子模块结构

每个半桥子模块由 2 个 IGBT 模块 T1 和 T2、储能电容 C、均压电阻 R_p 和保护开关(旁路开关 K1 和压接式封装晶闸管 K2) 等一次设备以及取能电路、子模块控制器(光纤通信驱动和集成电路)等二次设备组成,具体如图 3 所示.

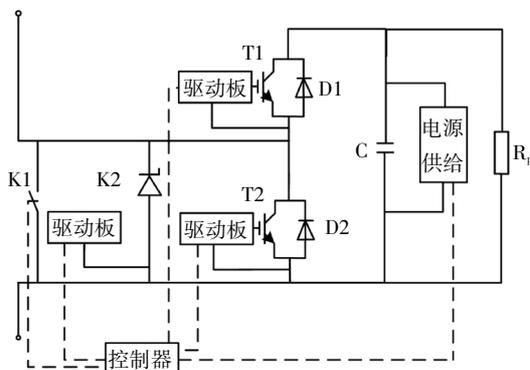


图 3 半桥子模块结构示意图

Fig.3 Configuration of a half-bridge submodule

2 MMC 模块可靠性分析方法

2.1 Copula 理论

随机变量的联合分布函数能反映变量间的相关特性. 因此,对于分析多维变量间的相关性最直接最有效的方法就是求解多维变量的联合分布函数. 但若随机变量服从非正态分布,其联合分布函数的显式表达式不易得出^[20]. 而 Copula 函数是一类可将变量的联合分布函数与它们各自的边缘分布函数连接到一起的函数,为求解联合分布函数提供了新的思路.

任何一个多维联合分布函数都可由若干个边缘分布函数以及描述相关结构的 Copula 函数来表示^[21]. 为了最大限度地反映信息量间的相关性和最简洁的结构^[22-23],可以从多个候选 Copula 函数中选择生成元为 $\varphi_{1/(1-\theta)}(t) = (-\ln t)^{1-\theta}$ 的 Gumbel-Copula 函数对 MMC 进行可靠性分析. 二维 Copula 函数定义为:

$$C_{1/(1-\theta)}(u, v) = \exp\left\{-\left[(-\ln u)^{\frac{1}{1-\theta}} + (-\ln v)^{\frac{1}{1-\theta}}\right]^{1-\theta}\right\} \tag{1}$$

式(1)中, u, v 为随机变量; $\theta \in (0, 1)$, 为随机变量 u 和 v 之间的相关系数. 若描述对象为多元联合分布函数,则 n 维 Gumbel-Copula 函数为:

$$C_{1/(1-\theta)}(F_1(T_1), F_2(T_2), \dots, F_n(T_n)) = \exp\left\{-\left[(-\ln T_1)^{\frac{1}{1-\theta}} + (-\ln T_2)^{\frac{1}{1-\theta}} + \dots + (-\ln T_n)^{\frac{1}{1-\theta}}\right]^{1-\theta}\right\} \tag{2}$$

式(2)中, $\theta = 0$ 表示所有 MMC 模块均独立, $\theta = 1$ 表示所有模块均完全相关,在实际 MMC 工程中不可能发生.

Sklar 定理^[24]: 令 $F(T_1, T_2, \dots, T_n)$ 为具有边缘分布 $F_1(T_1), F_2(T_2), \dots, F_n(T_n)$ 的 N 维联合分布函数,则存在一个 Copula 函数满足:

$$C(F_1(T_1), F_2(T_2), \dots, F_n(T_n)) = P(T_1 \leq t, T_2 \leq t, \dots, T_n \leq t) \tag{3}$$

若 $F_1(T_1), F_2(T_2), \dots, F_n(T_n)$ 是连续函数,则这个 Copula 函数是唯一确定的.

2.2 子模块及桥臂控制模块可靠性模型

根据图 3 所示的子模块结构以及运行原理,可建立元件的组合关系如图 4 所示,子模块的可靠性由 IGBT 模块、电容器、均压电阻、保护开关、子模块控制器和电源供给等共同决定.

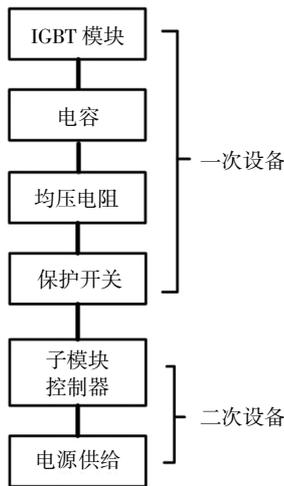


图 4 子模块组合关系图

Fig.4 Block diagram of submodule

本文假设 MMC 元件服从指数分布^[25], 则子模块可靠性为

$$R_{SM}(t) = R_1^2(t) \cdot R_{cap}(t) \cdot R_{Rp}(t) \cdot R_K(t) \cdot R_{SMC}(t) \cdot R_{PS}(t) = e^{-(2\lambda_1 + \lambda_{cap} + \lambda_{Rp} + \lambda_K + \lambda_{SMC} + \lambda_{PS})t} = e^{-\lambda_{SM}t} \quad (4)$$

式中: R_{SM} 、 R_1 、 R_{cap} 、 R_{Rp} 、 R_K 、 R_{SMC} 、 R_{PS} 分别为子模块、IGBT 模块、电容、均压电阻、保护开关、子模块控制器和电源供给的可靠性函数; 而 λ_1 、 λ_{cap} 、 λ_{Rp} 、 λ_K 、 λ_{SMC} 、 λ_{PS} 和 λ_{SM} 分别是 IGBT 模块、电容、均压电阻、保护开关、子模块控制器(光纤通信驱动设备和集成电路)、电源供给和子模块的故障率。

同理, 桥臂控制模块的可靠性函数可以表示如下:

$$R_{cp}(t) = e^{-\lambda_{cp}t} \quad (5)$$

MMC 中各元件故障率如表 1 所示。

表 1 元件故障率

Tab.1 Component failure rate data

元件	故障率(次/年)	来源
一次设备	IGBT 模块	0.000 876
	C	0.001 752
	Rp	0.002 321 4
	保护开关	0.009 172
二次设备	子模块控制器	0.001 402
	电源供给	0.035 040
	桥臂控制模块	0.026 28

2.3 相关系数获取方法

假设各个模块间均有相关性, 相关系数的获取通常采用极大似然估计^[30](Maximum likelihood estimation, MLE). 由于世界上第一个 MMC-HVDC 工

程——Trans Bay Cable 柔性直流输电工程从 2010 年才开始投运, 从原始的子模块寿命数据获取相关系数暂时无法实现, 因此, 为了获取模块间的模拟寿命数据, 可通过生成多组符合 λ_{SM} 、 λ_{cp} 指数分布规律的 MMC 系统关键元件寿命随机数据而获取。

首先利用式(4)(5)求出模块间累积分布函数为:

$$F(T \leq t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (6)$$

然后求取 $F(t)$ 的反函数:

$$F^{-1}(T) = -\lambda^{-1} \ln(1 - u) \quad (7)$$

式(7)中, u 为 $[0, 1]$ 间的任意随机数, 其服从均匀分布. 对 u 进行蒙特卡洛随机抽样, 用指数分布拟合元件的寿命数据, 因此, 模块间基于 Copula 理论的极大似然函数为:

$$\ln L = \sum_{i=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^N \ln f_i(T_{i1}) + \ln f_{cp}(T_{cp}) + \ln C_{U(1-\theta)}^N \left[F_1(T_{11}), F_2(T_{21}), \dots, F_N(T_{N1}), F_{cp}(T_{cp}) \right] \right\} = \sum_{i=1}^p \left\{ \sum_{i=1}^N \ln f_i(T_{i1}) + \ln f_{cp}(T_{cp}) - \left[\frac{(-\ln T_1)^{1/(1-\theta)} + (-\ln T_2)^{1/(1-\theta)} + \dots + (-\ln T_N)^{1/(1-\theta)} + (-\ln T_{cp})^{1/(1-\theta)}}{1-\theta} \right] \right\} \quad (8)$$

式中: p 是运行年数; $f_i(T_{i1}) = \lambda_{SM} e^{-\lambda_{SM} F^{-1}(T)}$ 是子模块的概率密度函数; $f_{cp}(T_{cp}) = \lambda_{cp} e^{-\lambda_{cp} F^{-1}(T)}$ 是桥臂控制模块的概率密度函数; $F_N(T_{N1}) = 1 - e^{-\lambda_{SM} F^{-1}(T)}$ 是子模块的累积分布函数; $F_{cp}(T_{cp}) = 1 - e^{-\lambda_{cp} F^{-1}(T)}$ 是桥臂控制模块的累积分布函数; T_{i1} 、 T_{cp} 分别为第 i 个子模块和控制模块的寿命随机变量, $i = 1, 2, \dots, N$. 将 $\ln L$ 极大化, 得到 $L(\theta)$ 参数的极大似然估计为:

$$\hat{\theta} = \arg \max L(\theta) \quad (9)$$

通过求解式(9)便可以得到 MMC 中子模块的相关系数 θ , 进而确定 θ 的范围。

3 基于 $kln(G)$ 模型的 MMC 可靠性建模

MMC 三相完全对称, 上、下桥臂也完全相同, 而与子模块密切相关的换流阀基控制系统也可分为上、下桥臂部分, 控制器结构也相同, 其三相完全对称且具备一定的独立性. 因此, 本文中 MMC 可靠性以一个桥臂的可靠性来表征。

3.1 表决系统可靠性基本计算模型

$kln(G)$ 系统是容错系统冗余特性下可靠性分析

领域的主流选择^[31]. 文献[32]和[33]给出了 $k/n(G)$ 系统的定义: G 系统由 n 个元件组成, 当 k 个或 k 个以上元件正常工作时, 系统正常运行; 当 $n-k+1$ 个元件故障时, 系统故障, 其可靠性示意模型如图 5 所示.

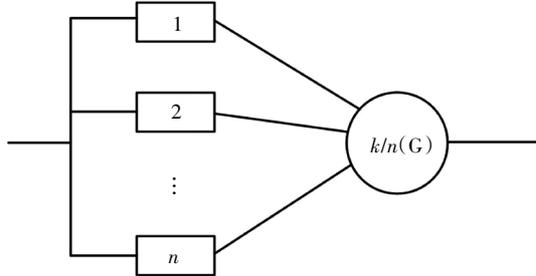


图 5 表决系统可靠性框图
Fig.5 Voting system reliability block diagram

3.2 计及模块间相关性的 MMC 可靠性建模

桥臂模块组合关系如图 6 所示. 当配置冗余子模块时, 由 $k/n(G)$ 表决系统可得, $N + N_0$ 个子模块以及桥臂控制模块组成的系统, 若有 N 个及以上的子模块和桥臂控制模块同时满足要求, 此时桥臂正常工作; MMC 不可靠有以下两种情况: 子模块故障数量大于 N_0 , 桥臂控制模块故障.

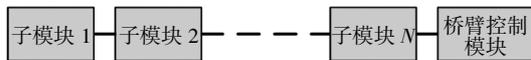


图 6 桥臂模块组合关系图
Fig.6 Block diagram of arm module

如图 6 的桥臂模块组合关系所示, 利用 Copula 函数的参数描述模块间的相关程度, 能较好地反映桥臂各模块间的非线性相关特性, 因此, 本文考虑所有模块间相关性用以描述实际控制装置与子模块之间的复杂关系, 重点建立计及模块间相关性的 MMC 可靠性分析模型.

假设初始时刻系统所有元件都处于理想状态且同时开始运行, 系统寿命取决于各元件寿命的最小值. 借鉴文献[31]中分析冗余配置下系统可靠性的模型, 设 t 时刻桥臂中有 k 个子模块和桥臂控制模块都无故障运行, 桥臂中其余的 $N+N_0-k$ 个子模块故障, 当 k 大于或者等于 N 时, 此时桥臂是可靠的, 此时定义事件 A_m : {子模块中有 m 个正常工作, 另外 $N + N_0 - m$ 个故障, 且桥臂控制模块正常, 其中 $m \geq N$ }, 可靠性概率为 $R_{A_m}(t)$, 且 A_m 包含的基本事件个数为选择数 $C_{N+N_0}^m$, 则配置子模块的桥臂可靠性函数为:

$$R(t) = R_{A_N}(t) + R_{A_{N+1}}(t) + \dots + R_{A_{N+N_0}}(t) = \sum_{m=N}^{N+N_0} C_{N+N_0}^m \times P \left\{ \begin{aligned} & \min(T_j^1, T_j^2, \dots, T_j^m, T_{cp}) > t, \\ & T_j^{m+1} \leq t, T_j^{m+2} \leq t, \dots, T_j^{N+N_0} \leq t \end{aligned} \right\} = \sum_{m=N}^{N+N_0} C_{N+N_0}^m \times \left\{ P(T_j^{m+1} \leq t, T_j^{m+2} \leq t, \dots, T_j^{N+N_0} \leq t) - P \left[\begin{aligned} & \min[(T_j^1, T_j^2, \dots, T_j^m, T_{cp})] \leq t, \\ & (T_j^{m+1} \leq t, T_j^{m+2} \leq t, \dots, T_j^{N+N_0} \leq t) \end{aligned} \right] \right\} \quad (10)$$

式(10)中, m 表示第 j 次从所有子模块中选择的正常工作的子模块个数, 且 $N \leq m \leq N+N_0$.

$$\begin{aligned} u_m &= P(T_j^1 > t, T_j^2 > t, \dots, T_j^m > t, T_{cp} > t) \\ x_m &= P \left\{ \begin{aligned} & \min[(T_j^1, T_j^2, \dots, T_j^m, T_{cp})] \leq t, \\ & (T_j^{m+1} \leq t, T_j^{m+2} \leq t, \dots, T_j^{N+N_0} \leq t) \end{aligned} \right\} \\ y_m &= P \{ \min[(T_j^1, T_j^2, \dots, T_j^m, T_{cp})] \leq t \} \\ z_m &= P(T_j^{m+1} \leq t, T_j^{m+2} \leq t, \dots, T_j^{N+N_0} \leq t) \end{aligned}$$

然后利用加法公式和 Sklar 定理, 可以得到 u_m 的表达式为:

$$u_m = \sum_{k=0}^m (-1)^k C_m^k (1 - e^{-\lambda_{su} t})^{m-k} - (1 - e^{-\lambda_{cp} t}) + \sum_{k=1}^m (-1)^{k+1} C_N^k \exp \left\{ - \left[(-\ln u_k)^{\frac{1}{1-\theta}} + (-\ln v)^{\frac{1}{1-\theta}} \right]^{1-\theta} \right\} \quad (11)$$

同理, x_m 可以看作 y_m 和 z_m 复合而成的 Copula 函数; z_m 可以看成 $N+N_0-k$ 维的 Copula 函数.

$$z_m = C^k(F_j^{k+1}(T_1), \dots, F_j^{N+N_0}(T_{N+N_0})) = \exp \left\{ - \left[(-\ln T_j^{N+N_0-k})^{\frac{1}{1-\theta}} \right]^{1-\theta} \right\} (1 - e^{-\lambda_{su} t})^{(N+N_0-k)^{1-\theta}} \quad (12)$$

则有

$$x_m = \exp \left\{ - \left[(-\ln \alpha_k)^{\frac{1}{1-\theta}} + (-\ln z_m)^{\frac{1}{1-\theta}} \right]^{1-\theta} \right\} \quad (13)$$

其中, $\alpha_k = 1 - u_m$.

因此, 配置冗余子模块后的桥臂可靠性为:

$$R(t) = \sum_{k=N}^{N+N_0} C_{N+N_0}^k (z_m - x_m) \quad (14)$$

若桥臂上仅有必备的子模块, 对比式(11), 不难得到其可靠性函数为:

$$R^N(t) = \sum_{k=0}^N (-1)^k C_N^k (1 - e^{-\lambda_{su} t})^{k^{1-\theta}} + (-1)^{k+1} C_N^k \exp \left\{ - \left[(-\ln u_k)^{\frac{1}{1-\theta}} + (-\ln v)^{\frac{1}{1-\theta}} \right]^{1-\theta} \right\} - (1 - e^{-\lambda_{cp} t}) \quad (15)$$

4 算例分析

以某柔性直流输电工程^[34]为例进行可靠性分析. 该工程每个桥臂有 48 个子模块实际投入运行, 另配有 8 个冗余子模块. 通过 150 组符合指数分布规律的 MMC 子模块和桥臂控制模块寿命数据, 代入式 (8) 中, 求得相关系数 θ 的平均值约为 0.05 且取值范围在 0~0.1 之间. 下面将在考虑模块间的相关性的基础上, 分析 MMC 可靠性变化趋势.

首先分析桥臂仅有必备子模块时的可靠性, 运行年限 $t = 20$, 由式 (15) 可计算出桥臂的可靠度并绘制曲面图, 如图 7 所示.

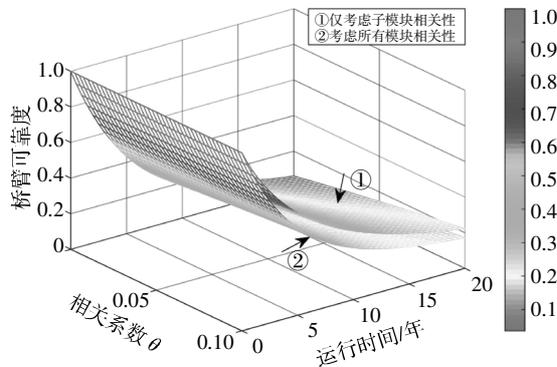


图 7 桥臂可靠度曲线

Fig.7 Reliability curve of the arm

定义情况①: 仅考虑所有子模块相关; 情况②: 考虑桥臂控制模块与所有子模块间的相关. 从图 7 可看出, 随着运行年数的增加, MMC 桥臂可靠性迅速下降, 当运行年数 $t = 10$ 时桥臂可靠度已下降至很低水平, 具有 6 个桥臂的 MMC 可靠性将更低, 显然不能满足 HVDC 系统的可靠性要求. 同时, 随着运行年数的增加, 情况①与情况②下的桥臂可靠性计算偏差较大, 两者可靠度最大差值足有 0.18. 因此桥臂控制模块对 MMC 可靠性有较大影响, 在实际工程中应注意检修与防护, 延长其寿命, 有利于提高系统的可靠性.

由式 (15) 知, 模块间相关性对桥臂可靠性有影响, 因此, 进一步单独描述相关程度对桥臂可靠性的影响加以分析. 桥臂可靠性随运行时间变化如图 8 所示. 从图 8 可看出, 随着运行时间的增加桥臂可靠性迅速降低, 且桥臂的可靠性随着相关系数的增大而增大; 对于同一相关系数, 情况②的桥臂可靠性将明显低于情况①的桥臂可靠性, 并且相差越大越明显, 这也证明了忽略桥臂控制模块与子模块之间的

相关性将对可靠性计算造成不准确影响. 在实际工程的 MMC 可靠性设计中, 应综合考虑各个模块间相关性的影响, 避免 MMC 可靠性计算结果不精确.

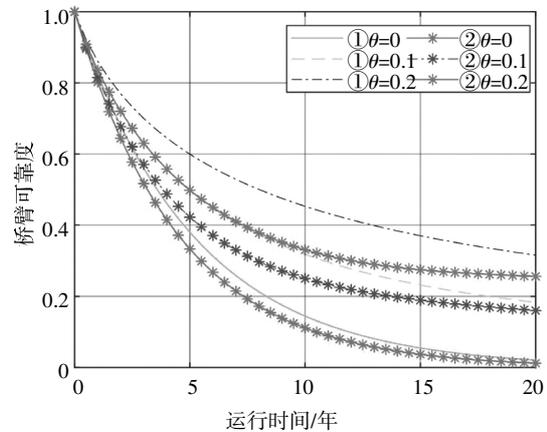


图 8 考虑不同相关程度桥臂可靠度

Fig.8 The arm reliability with different levels of relevance

下面进一步分析配置冗余子模块的桥臂可靠性, 由式 (14) 计算得到相应的可靠性数值如表 2 所示, 并绘制三维曲面如图 9 所示.

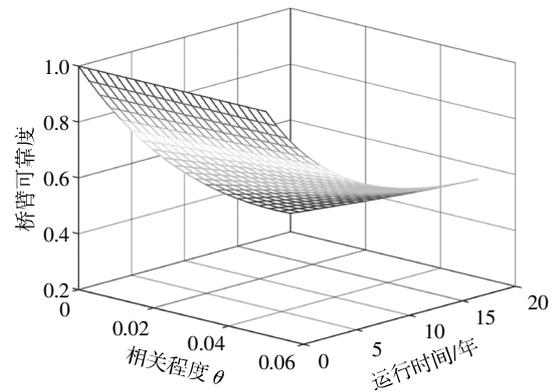


图 9 配置冗余子模块的桥臂可靠性

Fig.9 The arm reliability with configuring redundant SM

表 2 桥臂可靠性
Tab.2 Reliability of an arm

使用年数	相关程度	可靠性
5	0	0.717 9
5	0.05	0.757 6
10	0	0.515 4
10	0.05	0.631 8
15	0	0.370 0
15	0.05	0.571 3

结合图 9 和表 2 分析可知, 对于配置冗余子模块的桥臂而言, 模块间相关系数越大, 桥臂的可靠性

越高;当使用时长增加时,桥臂可靠性受相关系数的影响越来越显著.

同样地,分析桥臂可靠度随模块间相关程度的变化情况,其结果如图10所示.从图10中可看出,桥臂可靠性随 θ 的增大而增大,对于配置冗余子模块的MMC,相关系数越大即相关性越强时,桥臂可靠性越高.其物理解释为:随着模块间相关系数的增加,所有模块寿命的增加或下降的变化趋势将趋于一致,这种趋势降低了桥臂模块间的独立性,换言之,较高相关系数等价于较少数量的等效独立子模块,桥臂的整体可靠性更接近于单个子模块个体的可靠性.因此,综合考虑MMC各模块间的相关性对设计MMC可靠性有较大意义.

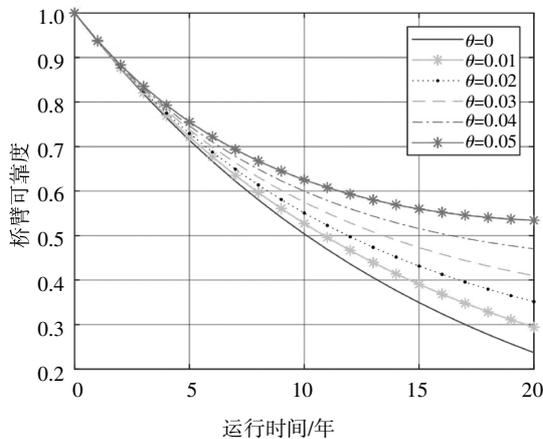


图10 考虑模块间不同相关程度的桥臂可靠度
Fig.10 The arm reliability with different degrees of correlation among modules

不同的冗余子模块数目所带来的可靠性增益也不尽相同,需进一步分析不同冗余子模块对系统可靠性的影响,以便确定最佳冗余比.具体地,在表决系统的基础上,取 $\theta = 0.05$,运行最大时间20年,计算桥臂可靠度如图11所示.为了更加直观地研究配置冗余子模块后可靠性的提高情况,选取 $t = 10$ 时,绘制出配置冗余子模块个数与MMC可靠性的关系图,如图12所示.

从图11中可看出,当子模块冗余度增加时,桥臂可靠度在同一运行年数也相应增加,当配置冗余数量 $N_0 = 6$ 时,桥臂可靠度均达到0.5,且配置4个冗余子模块之后,再增加冗余子模块,对提高可靠性的幅度不大;从图12可以看出,当MMC运行年限为10年,配置4个冗余子模块时,MMC可靠性有大幅

度提升,超出该范围后再增加冗余子模块,可靠性的改善相对较小,反而导致经济性降低.因此,在算例分析中可以确定提出的可靠性模型的最佳冗余度为8.3%,为进一步扩大可靠性增益,可采用定期维护和检修以保证MMC系统高可靠性运行.

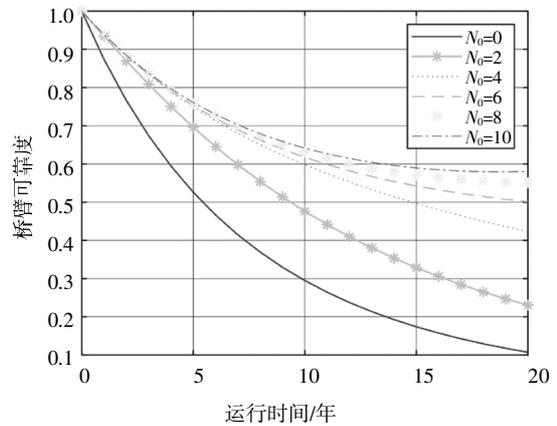


图11 考虑冗余子模块数量的桥臂可靠度
Fig.11 The arm reliability changes with redundant SM count

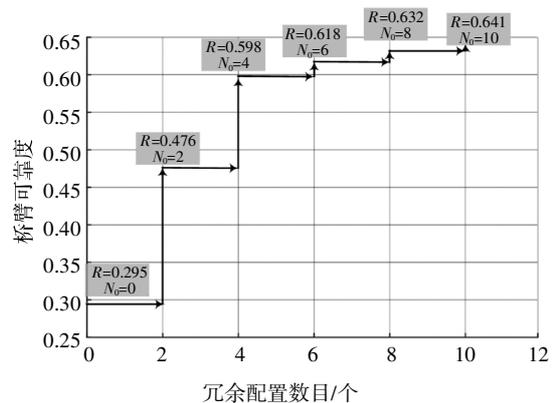


图12 冗余配置后可靠性增益($t = 10$)
Fig.12 Reliability gain graph with redundant configuration

5 结论

本文基于Copula理论的变量联合概率分布函数构造方法,考虑桥臂控制模块与所有子模块间相关性,建立了基于半桥结构的模块可靠性模型,进而基于 $k/n(G)$ 模型建立了MMC桥臂可靠性分析模型.最后,本文就相关程度冗余子模块数量对MMC桥臂可靠性的影响进行了定量分析,得到如下结论:

1)通过模拟MMC系统元件的可靠性数据,利用极大似然估计获取模块间的相关系数,解决以往分析中无法反映模块间相关程度的问题.随着实际运

行的可靠性数据愈加饱满,本文方法也将为 MMC-HVDC 提供模拟数据的模型。

2)实际工程中综合考虑 MMC 各个模块间的相关性,可进一步提升可靠性分析的精确性。

3)考虑模块间相关性时,算例反映了设置冗余比为 8.3%,对 MMC 系统可靠性有较大幅度提高,可在工程设计阶段为其提供参考;同时,在 MMC 运行一段时间后,冗余配置对提高 MMC 可靠性贡献不大,反而应注意投入人力、物力对现役设备进行维护。

参考文献

- [1] 辛业春,王威儒,李国庆,等. 基于桥臂电流直接控制的模块化多电平换流器控制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(10):121—126.
XIN Y C, WANG W R, LI G Q, *et al.* Control strategy of modular multilevel converter based on arm current direct control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10):121—126. (In Chinese)
- [2] 黄守道,付雪婷,饶宏,等. 基于 Semi-Markov 的模块化多电平换流器的可靠性分析及其冗余配置策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(7):128—133.
HUANG S D, FU X T, RAO H, *et al.* Reliability analysis and redundant configuration strategy of MMC based on Semi-Markov [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7):128—133. (In Chinese)
- [3] 司志磊,陆翌,韩坤,等. 基于桥臂阻尼阀组的模块化多电平换流器故障快速清除与系统恢复技术[J]. 电力自动化设备,2018,38(7):60—74.
SI Z L, LU Y, HAN K, *et al.* Fast fault clearance and system recovery technology of MMC based on bridge-arm damping valve groups [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7):60—74. (In Chinese)
- [4] 孙栩,朱晋,刘文龙,等. 一种具有故障隔离能力的 MMC-HVDC 换流站子模块拓扑研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(3):120—125.
SUN X, ZHU J, LIU W L, *et al.* Fault-isolated sub-module topology of MMC-HVDC converter station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3):120—125. (In Chinese)
- [5] 阳岳希,杨杰,贺之渊,等. 基于 MMC 的背靠背柔性直流输电系统控制策略[J]. 电力系统自动化,2017,41(4):120—124.
YANG Y X, YANG J, HE Z Y, *et al.* Control strategy of MMC based back-to-back HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4):120—124. (In Chinese)
- [6] 孙世贤,田杰. 适合 MMC 型直流输电的灵活逼近调制策略[J]. 中国电机工程学报 2012,32(28):62—67.
SUN S X, TIAN J. Flexible approach modulation strategy for HVDC based on modular multilevel converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28):62—67. (In Chinese)
- [7] 荣飞,田新华,黄守道,等. 模块化多电平变流器输出电流谐波抑制策略[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2017,44(2):80—87.
RONG F, TIAN X H, HUANG S D, *et al.* Harmonic suppression strategy of output current for modular multilevel converter[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(2):80—87. (In Chinese)
- [8] GUO J, WANG X, LIANG J, *et al.* Reliability modelling and evaluation of MMCs under different redundancy schemes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017:2087—2096.
- [9] 黄守道,王海宁,荣飞,等. 考虑系统损耗的 MMC 换流阀冗余配置策略[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(6):1—8.
HUANG S D, WANG H N, RONG F, *et al.* Redundant configuration strategy of MMC converter valve considering system loss [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6):1—8. (In Chinese)
- [10] 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 M, WANG J J, SONG Q. Reliability modeling and redundancy analysis of converter valves for VSC-HVDC power transmission system based on $k/n(G)$ model[J]. Power System Technology, 2008, 32(21):32—36. (In Chinese)
- [11] XU J Z, ZHAO P, ZHAO C. Reliability analysis and redundancy configuration of MMC with hybrid submodule topologies [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(4):2720—2729.
- [12] GUO J L, LIANG J, ZHANG X, *et al.* Reliability analysis of MMCs considering sub-module designs with individual or series operated IGBTs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016:666—677.
- [13] 王朝亮,叶方彬,严华江,等. 热备用子模块对 MMC 运行特性影响分析[J]. 新型工业化,2015,5(10):48—58.
WANG C L, YE F B, YAN H J, *et al.* Analysis of the influence of active redundant sub-module on operation characteristics for MMC [J]. The Journal of New Industrialization, 2015, 5(10):48—58. (In Chinese)
- [14] 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.
- [15] XU J, JING H, ZHAO C. Reliability modeling of MMCs considering correlations of the requisite and redundant submodules [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3):1213—1222.
- [16] 井皓,许建中,徐莹,等. 考虑子模块相关性的 MMC 可靠性分析方法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(13):175—182.
JING H, XU J Z, XU Y, *et al.* Reliability analysis of MMC considering the submodule correlations [J]. Proceeding of the CSEE, 2017, 37(13):175—182. (In Chinese)

- [17] KONSTANTINOOU G,POU J,CEBALLOS S,*et al.* Active redundant submodule configuration in modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2013,28(4):2333—2341.
- [18] 时伯年,洪潮,孙刚,等. 交流不对称故障下的 LCC-MMC 混合直流系统输送功率提升策略研究 [J]. 电力系统保护与控制,2017,45(20):73—78.
SHI B N,HONG C,SUN G,*et al.* Research on power transmission enhancement strategy of LCC-MMC hybrid HVDC system under AC symmetric fault [J].Power System Protection and Control,2017,45(20):73—78. (In Chinese)
- [19] 许建中,李承昱,熊岩,等. 模块化多电平换流器高效建模方法研究综述[J]. 中国电机工程学报,2015,35(13):3381—3392.
XU J Z,LI C Y,XIONG Y,*et al.* A review of efficient modeling methods for modular multilevel converters [J].Proceedings of the CSEE,2015,35(13):3381—3392. (In Chinese)
- [20] QIU Z,ELISHAKOFF I. Antioptimization of structures with large uncertain-but-non-random parameters via interval analysis [J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering,1998,152(3):361—372.
- [21] LI D X. On Default correlation: A copula function approach [J]. Journal of Fixed Incom,2000,9(4):332—336.
- [22] 唐小松,李典庆,周创兵,等. 联合分布函数构造的 Copula 函数方法及结构可靠度分析[J]. 工程力学,2013,30(12):8—17.
TANG X S,LI D Q,ZHOU C B,*et al.* Modeling bivariate distribution using copulas and its application to component reliability analysis[J]. Engineering Mechanics,2013,30(12):8—17. (In Chinese)
- [23] LINDSKOG F. Modelling dependence with copulas and applications to risk management [J]. Handbook of Heavy Tailed Distributions in Finance,2003:329—384.
- [24] NELSEN R. An introduction to copulas [M]. New York: Springer,2006.
- [25] 陆丹,袁越. 基于故障树蒙特卡洛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 D,YUAN Y. Weak part identification based on fault-tree Monte Carlo simulation for islanded microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(4):38—44. (In Chinese)
- [26] GRINBERG R,RIEDEL G,KORN A,*et al.* On reliability of medium voltage multilevel converters [C]//Proceedings of 5th IEEE Energy Conversion Congress and Exposition.Denver:IEEE,2013:4047—4052.
- [27] CHANKI K,LEE S. Redundancy determination of HVDC MMC modules[J]. Electronics,2015,4(3):526—537.
- [28] 王秀丽,郭静丽,康辉,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 X L,GUO J L,PANG H,*et al.* Structural reliability analysis of modular multi-level converters [J]. Proceeding of the CSEE,2016,36(7):1908—1914.
- [29] GUO J,WANG X,LIANG J,*et al.* Reliability modeling and evaluation of MMCs under different redundancy schemes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2018,33(5):2087—2096.
- [30] 陈孝信,钱勇,许永鹏,等. 基于 3F-C 法的局部放电脉冲信号能量最大似然估计[J]. 高电压技术,2017,43(2):460—467.
CHEN X X,QIAN Y,XU Y P,*et al.* Maximum likelihood estimation of energies in partial discharge pulse signals based on 3F-C method [J]. High Voltage Engineering,2017,43(2):460—467. (In Chinese)
- [31] LI X Y,CHEN C J,JIANG T. A copula-based reliability for non-repairable multi-state k-out-of-n systems with dependent components[J]. Journal of Risk and Reliability,2016,8:1—14.
- [32] KUO W,ZUO M J. Optimal reliability modeling: principles and applications [M]. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd,2003:231—234,257—259.
- [33] SCHLEGEL R,Herr E,Richter F. Reliability of non-hermetic pressure contact IGBT modules [J]. Microelectronics Reliability,2001,41:1689.
- [34] 徐政,屠卿瑞,管敏渊,等. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2013:458—459.
XU Z,TU Q R,GUAN M Y,*et al.* Flexible direct current transmission system [M]. Beijing: Mechanical Industry Press,2013:458—459. (In Chinese)