

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231375

高压直流输电系统可靠性分析方法综述

李康^{1,2}, 黄萌^{1,2}, 查晓明^{1,2}, 陈蓉珺³

(1. 综合能源电力装备及系统安全湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072; 3. 国家电网有限公司直流技术中心, 北京 100052)

摘要: 高压直流输电系统因具有输送容量大、能耗低且能实现电力系统非同步互联等优势而得到广泛应用, 其可靠性分析可为系统提供重要的运维及决策依据。因此, 围绕现阶段国内外高压直流输电系统可靠性分析方法进行了归纳总结。首先阐述了传统直流输电、柔性直流输电系统的组成差异, 并对输电系统常用的可靠性指标作了相应归纳。其次, 从统计法、手册法、状态空间法及其他方法等层面出发, 分别对高压直流输电系统可靠性建模的基本原理及研究现状进行了分析, 对各类方法的优缺点进行了对比, 并探讨了柔性直流输电系统在可靠性分析方面存在的新挑战。最后, 针对当前研究中存在的不足, 对高压直流输电系统可靠性分析方法进行讨论与展望。

关键词: 传统直流输电; 柔性直流输电; 可靠性分析; 统计法; 手册法; 状态空间法

An overview of reliability analysis methods for an HVDC transmission system

LI Kang^{1,2}, HUANG Meng^{1,2}, ZHA Xiaoming^{1,2}, CHEN Rongjun³

(1. Key Laboratory for Integrated Energy Power Equipment and System Safety of Hubei Province, Wuhan 430072, China;
2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
3. DC Technical Center of State Grid Corporation of China, Beijing 100052, China)

Abstract: The high voltage direct current transmission system (HVDC) is widely used because of its advantages of large transmission capacity, low energy consumption, and the ability to achieve asynchronous interconnection of power systems. Reliability analysis can provide an important operational and decision-making basis for the system. Therefore, reliability analysis methods for HVDC at present, at home and abroad, are summarized. First, the differences in the composition of traditional HVDC and voltage source converter-based HVDC (VSC-HVDC) are explained, and the commonly used reliability indicators of HVDC are described. Secondly, starting from the perspectives of statistical, manual, state space and other methods, the basic principles and research status of reliability modeling for HVDC are analyzed. The advantages and disadvantages of various methods are compared, and the new challenges in reliability analysis of VSC-HVDC are discussed. Finally, given the shortcomings in current research, the reliability analysis methods for HVDC are discussed and prospected.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52222707).

Key words: traditional HVDC; VSC-HVDC; reliability analysis; statistical methods; handbook methods; state space methods

0 引言

高压直流输电因其具有灵活性高、损耗低等优势而得到了大力发展, 在远距离大功率输电、交流系统间的非同步互联以及海底输电等领域得到广泛

应用^[1]。然而, 随着工程实践规模的日益壮大, 高压直流输电系统受设备故障、恶劣自然环境及人为等因素影响, 发生了各种严重事故^[2-3]。如 2019 年 8 月 23 日, 施州站中换流阀子模块驱动电源发生短路, 导致中控板无法发出旁路开关合闸指令, 并引发阀控系统跳闸; 2020 年 1 月 14 日, 中州站极 I 高端主阀内部板卡发生内存异常变位, 导致换流变压器的进线断路器跳闸, 以及极 I 高端阀组闭锁;

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52222707); 国网直流中心科技项目资助(529911230002)

2021年3月10日,复龙站某换流变压器分接开关的压力释放阀二次接线盒内部受潮引起保护误动,致使极I低端阀组闭锁;2022年2月24日,拉萨站极II直流滤波器首端的光纤电流互感器测量回路发生故障,导致极2两套极保护主机均报紧急故障并退出运行,且引发极II闭锁。以上事故造成了严重的经济损失。

可靠性分析可为高压直流输电系统的可靠性管理提供决策依据,可作为“预防、发现和纠正可靠性设计”的参考。系统进行可靠性分析时发现运行过程中的潜在问题,并指导后续系统运维,从而不断提升系统可靠性。因此,分析直流输电系统的可靠性,是一项十分重要的工作。

上世纪60年代,加拿大学者 R.Billinton 展开了关于高压直流系统可靠性的研究。随后,国际大电网会议(CIGRE)组织了一批研究人员逐步开展了高压直流输电系统可靠性分析的工作,并收集了大量用于分析高压直流输电系统可靠性的数据,提出了相应的可靠性分析指标,为高压直流输电系统的可靠性分析奠定了理论基础。有研究表明,概率分布法(probability distribution method, PDM)是较早用于输电系统可靠性分析的方法。如文献[4]基于该方法对金斯诺斯输电工程可靠性进行了分析,主要通过系统中部件故障率等参数来计算系统多运行状态下的概率,该方法具有灵活、简单等优势。然而,无法用于分析系统在多种状态之间的转移情况,可能引入一定的误差。此外,该方法在建立系统故障与多容量状态的概率模型时也存在一定的复杂度。因此,文献[5]将 Markov 过程分析模型引入到高压直流输电系统可靠性分析当中,并提出了基于频率和持续时间(frequency and duration, FD)的可靠性分析方法。与国外相比,我国关于高压直流输电系统可靠性分析相关领域的研究较晚,始于上世纪80年代,最初主要集中在系统可靠性指标等方面,基于 Markov 过程^[6-7]提出了转移频率、等效转移率等可靠性指标,并推动了高压直流输电系统可靠性评估的 FD 法的发展^[8];此后,为了更深入分析复杂系统的可靠性,提出了故障树分析方法(fault tree analysis, FTA)。然而,在分析系统可靠性时故障树分析法存在建模难度大的问题,在此背景之下,又提出了目标导向法(goal-oriented method, GO),该方法具有建模难度小、模型精度高的优势。此外,有学者将贝叶斯网络与 GO 法进行结合,提出基于贝叶斯网络的 GO 法,该方法可忽略共有信号的影响。

由上述简要内容可知,国内在高压直流输电系统可靠性分析领域的研究比国外领先一步,为高压直流输电系统的可靠性分析提供了重要的指导作用。

目前,国内外对高压直流输电系统可靠性分析的研究相对较少,且缺乏系统性的归纳整理和深入分析。因此,本文围绕高压直流输电系统可靠性分析方法展开综述,主要内容包括:1)对高压直流输电系统组成进行阐述;2)从统计法、手册法、状态空间法等方面对高压直流输电可靠性分析方法进行了全面归纳,并作了对比分析及深入讨论;3)对柔性直流输电系统中可靠性分析方法进行了探讨,并总结了当前面临的挑战;4)对高压直流输电系统可靠性分析方法进行了展望思考。

1 系统组成及可靠性指标

1.1 高压直流输电系统组成

高压直流输电系统总体上可以分为两类。一类是以晶闸管为核心换流器件的输电系统,被称为传统直流输电系统;另一类是以可控关断半导体为核心换流器件的输电系统,称为柔性直流输电系统。

其中,传统直流输电系统包括换流站和输电线路等,如图1^[9]所示。其中,换流站包括换流阀(核心器件为晶闸管,此外,还包含阀基电子、阀电抗器、均压电容、均压电阻及水冷系统等)、换流变压器、平波电抗器、开关设备、滤波装置、无功补偿器、控保系统和通信系统等。

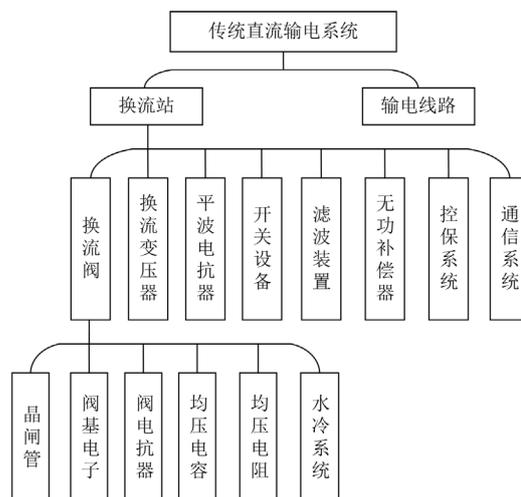


图1 传统直流输电系统

Fig. 1 Traditional HVDC transmission system

柔性直流输电系统基本组成与传统直流输电相似,主要包括换流站及输电线路等,如图2^[10]所示。其中,换流站的主要设备一般包括换流阀(核心器件为 IGBT,此外也包括直流储能电容、放电电阻、

旁路开关、二次控制板、水冷系统等)、换流变压器、平波电抗器、开关设备、滤波装置、控保装置、远程通信和启动电阻等。

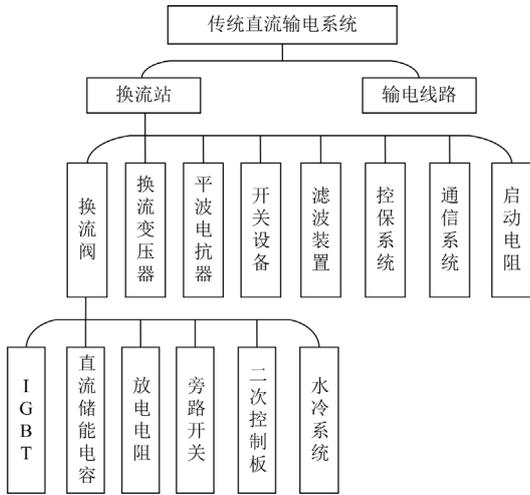


图2 柔性直流输电系统

Fig. 2 VSC-HVDC transmission system

不论是传统直流输电系统还是柔性直流输电系统，从功能角度来看，均能发挥电网互联及电力输送的作用；但从输电技术角度来看，前者是基于晶闸管的直流输电技术，而后者则主要是基于功率半导体器件 IGBT 的直流输电技术，二者之间存在较大的技术性变革，因此导致系统组成上存在差异。

1.2 可靠性指标

表 1 为高压直流输电系统中一些常用的可靠性指标。从表中可知，目前用于高压直流输电系统中的可靠性指标与时间、容量及概率等相关。与时间相关的指标主要有故障率、修复率、稳态可用度、稳态不可用度、能量可用率和能量不可用率等；与容量相关的指标主要为电量不足期望；与概率相关的指标主要为状态概率。其中，能量可用率、能量不可用率应用于高压直流输电系统的可靠性统计，在可靠性分析时可基于时间参数直接求得，无须构建复杂的数学分析模型。

表 1 高压直流输电系统可靠性指标

Table 1 Reliability indicators of HVDC transmission system

序号	指标	英文	公式	注解
1	故障率 λ	Failure rate	$\lambda = N / T_0$	故障率是指统计对象在单位统计时间 (T_0) 内的故障次数 (N)
2	修复率 μ	Repair rate	$\mu = 1 / T_r$	修复时间 T_r 的倒数
3	稳态可用度 A	Steady state availability	$A = \mu / (\mu + \lambda)$	稳态条件下给定时间区间内的瞬时可用度均值
4	稳态不可用度 U	Steady state unavailability	$U = \lambda / (\lambda + \mu)$	稳态条件下给定时间区间内的瞬时不可用度均值
5	能量可用率 μ_{EA}	Energy availability	$\mu_{EA} = T_{EaH} / T_{PH}$	统计对象等效可用小时 (T_{EaH}) 与统计小时数 (T_{PH}) 之比的百分数
6	能量不可用率 μ_{EU}	Energy unavailability	$\mu_{EU} = 1 - \mu_{EA} = T_{EoH} / T_{PH}$	统计对象等效不可用小时数 (T_{EoH}) 与统计小时数 (T_{PH}) 之比的百分数
7	停运率 R_o	Outage rate	$R_o = N_o / T_{PH}$	元件或系统停运次数 (N_o) 与统计时间 (T_{PH}) 的比值
8	灵敏度 S	Sensitivity	$S = \delta_x / \delta_M$	系统可靠性参数变化 (δ_x) 对元件可靠性参数变化 (δ_M) 的关系，即偏微分关系
9	状态概率 P_s	State probability	—	元件处在某状态的可能性
10	电量不足期望 E_{ENS}	Expected energy not served	$E_{ENS} = (X - C_r) \cdot P(X)$	X 为停运容量、 C_r 为系统备用容量、 $P(X)$ 为停运容量
11	可靠度 R	Reliability	$R = f(\cdot)$	统计对象在规定的条件下和规定的时间内，完成规定功能的能力， $f(\cdot)$ 表达式取决于分布类型
12	寿命 L	Lifetime	$Y = T_2 - T_1$	当前时刻 (T_1) 到设备失效时刻 (T_2) 的时间间隔
13	平均无故障运行时间 T_{MTBF}	Mean time between failure	—	统计对象两次故障之间的时间均值
14	平均修复间隔时间 T_{MTBR}	Mean time between repairs	—	无故障的统计对象到出现故障可持续的时间
15	平均无故障时间 T_{MTTF}	Mean time to failure	—	统计对象从开始运行到发生故障的时间
16	平均维修时间 T_{MTTR}	Mean time to repair	—	设备故障恢复到正常运营状态下的平均时间

2 高压直流输电系统可靠性分析方法

高压直流输电系统的可靠性分析方法主要包括统计法、手册法、状态空间法及其他方法等4大类,具体如图3所示。其中,手册法涵盖可靠性框图法、故障树分析法、故障模式与影响分析法等;状态空间法包括马尔可夫法、频率和持续时间法及状态枚举法等;其他方法主要有蒙特卡洛法、GO法、贝叶斯网络法和卷积法等。

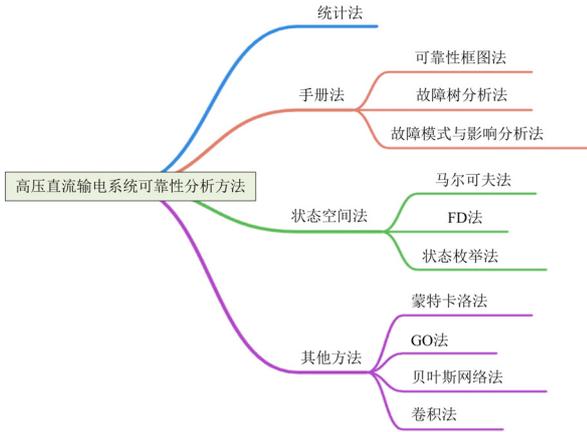


图3 高压直流输电系统可靠性分析方法归纳

Fig. 3 Summary of reliability analysis methods for HVDC

2.1 统计法

基于统计法对柔性直流输电系统可靠性进行分析,主要包括3个步骤:首先,根据各换流站实际运行过程中强迫停运、计划停运时间等参数,对各换流站可靠性进行计算;其次,讨论分析柔性直流输电系统不同运行方式,确定可靠性分析子系统的划分依据。最后,求解子系统级及全系统级的能量可用率、能量不可用率等可靠性指标。具体流程如图4所示。随着高压直流输电工程实践的不断推进,统计法在可靠性分析工作中得到广泛应用,并被我国电力行业标准DL/T989—2013《直流输电系统可靠性评价规程》所采纳^[11]。

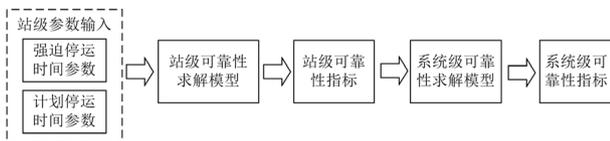


图4 输电系统可靠性指标求解流程

Fig. 4 Solution process for reliability indicators of VSC-HVDC

当采用该方法分析多端柔性直流输电系统可靠性时,通常需要综合考虑各换流站的停运时间及容量等参数。如,可利用式(1)求解多端柔性直流输电系统的能量可用率,其他可靠性指标亦可以此为基

础进行计算。

$$\mu_{EA} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{EAi} \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (1)$$

式中: μ_{EA} 为由 n 个子系统组成的多端式直流输电系统的能量可用率; μ_{EAi} 为第 i 个子系统的能量可用率; P_i 为第 i 个子系统的额定输送容量, MW。

事实上,现有的《直流输电系统可靠性评价规程》在分析多端柔性直流输电系统可靠性时主要依赖站级可靠性指标进行系统级可靠性求解,但没有考虑系统的实际运行情况,因此,在后续标准修订时应将系统运行方式或运行状态纳入可靠性模型的构建中。

2.2 手册法

一个系统通常由多个基本单元通过一定的逻辑方式连接起来,形成一个网络整体,因此各单元之间存在某些关联性,并可能存在一定的相互作用。在系统逻辑网络的基础上,一些学者展开了研究,并形成了可靠性框图法、故障树法及故障模式与影响分析法等适用于直流输电系统的可靠性分析方法。这些方法大都需要通过查找手册,并基于故障率等参数对系统进行可靠性建模。

可靠性框图法(reliability block diagram, RBD)是系统可靠性分析中的基本方法^[12],该方法主要是从系统可靠性层面出发,将分析对象与所组成的子部件通过一定逻辑关系以框图形式连接起来^[13-14],从而表示子部件运行状态对系统整体可靠性的影响。

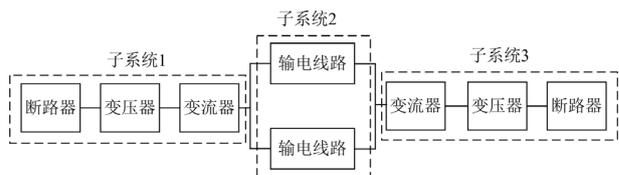


图5 可靠性框图

Fig. 5 Reliability block diagram

文献[15]基于 $k/n(G)$ 系统建立了不同拓扑下换流阀的可靠性模型,提出了输电系统可靠性评估方法,式(2)为典型的 $k/n(G)$ 系统可靠度函数表达式。

$$R(t) = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} e^{-i\lambda_s t} (1 - i\lambda_s t)^{n-i} \quad (2)$$

式中: λ_s 为分析对象的失效率; n 为系统中总的部件或单元数量; k 为系统中必须正常工作的最小部件或单元数量。

基于所构建的换流阀可靠性模型，分析了冗余度对失效率的影响，二者关系如图 6 所示。由图 6 可知，当冗余度为 0%~25%时，CTL 换流阀的故障率变化小于 MMC 换流阀。CTL 换流阀的故障率从 1.3 次/年降至 0.8 次/年，降幅较小；而 MMC 换流阀故障率则从 3 次/年降为 0.8 次/年，降幅较大。当冗余度大于 25%时，CTL 换流阀与 MMC 换流阀的故障率下降趋势基本趋于一致，但下降趋势较为缓慢。综上可知，冗余度只能在一定程度上对可靠性造成影响。因此，为提升换流阀可靠性，需要对冗余度进行折中考虑。

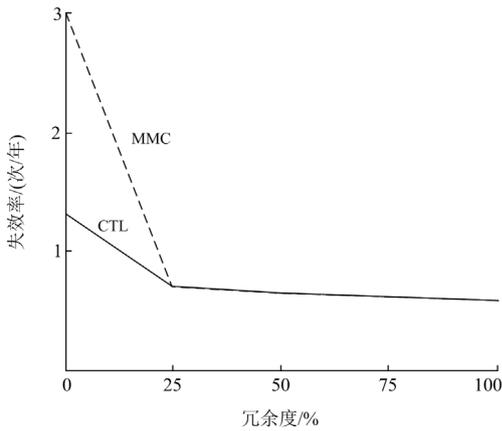


图 6 故障率随冗余度的变化

Fig. 6 Change in failure rate with redundancy

文献[16]采用可靠性框图法构建了特高压混合输电系统可靠性模型，并以系统历史运行数据为基础，获取各装置的可靠性参数，提出了基于特性参数矩阵的系统可靠性分析方法。该方法能在一定程度上解决传统可靠性分析中计算效率低的问题，但并未提及特性参数矩阵构建和选择的具体方法，论述不够深入。文献[17]基于换流阀子单元结构分析，建立了系统可靠性框图，并以 $k/n(G)$ 模型为基础构建了换流阀主电路可靠性模型。在 $k/n(G)$ 模型基础上，对基于不同晶闸管换流阀系统的可靠度、可靠性边际效益等指标进行了计算，并提出了相应的可靠性优化方法。然而，所提可靠性模型需要考虑较多元件类型和状态，导致可靠性计算非常耗时。与此同时，该模型主要描述的是系统静态可靠性，未考虑系统元件状态变化时对可靠性模型构建的影响。

故障树分析法^[18-19](fault tree analysis, FTA)是以树状图的形式将系统各类故障关系呈现出来，图 7 展示了输电系统典型的故障树模型示意图，主要是以底层事件为基础，对系统的故障进行描述。该方法可对系统进行定性或定量分析，对其中的最小割集或关键路径进行优化后，可实现可靠性的提升。

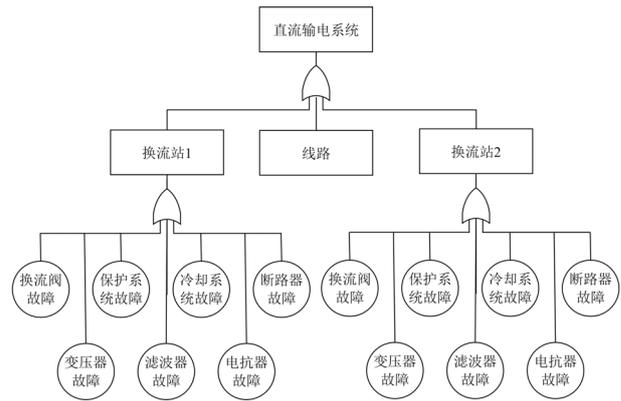


图 7 故障树模型示意图

Fig. 7 Schematic diagram of fault tree model

文献[20]基于元件对输电系统可靠性的影响分析，构建了故障树法与 FD 法相结合的可靠性模型，实现了关键元件的灵敏度分析，有助于识别系统薄弱环节，且能对多因素影响下的系统可靠性进行分析。然而，该模型以大量故障率、维修率等数据作为输入，计算量较大。文献[21]对系统结构进行了分析，形成了直流输电系统的子系统划分方法，并基于故障树思想与 FD 法构建了考虑子系统划分的直流输电系统可靠性模型。表 2 为所求得系统可靠性结果，主要包括系统状态概率、频率及平均持续时间等指标。将表中的数据作为模型(式(3))输入，则可以计算得到系统的总等值停运时间、能量可用率等的可靠性指标。与已有的可靠性数据相比，求解得到的可靠性结果较高。主要原因有：1) 考虑了系统双极停运的情况；2) 将系统单个元件也纳入可靠性模型进行分析。因此，可靠性模型精度更高。然而，该模型需要对每个子系统进行独立分析，计算复杂度相对较高。

表 2 可靠性结果

Table 2 Reliability result

运行方式	状态概率/%	平均持续时间/h
双极运行	97.65	722.70
单极运行	2.34	17.52
双极停运	0.01	6.06

$$\begin{cases} T_{EOT} = \frac{8760}{P_S} \sum P(x)L_S \\ \mu_{EU} = \frac{\sum P(x)L_S}{8760P_S} \times 100\% \\ \mu_{EA} = 1 - \mu_{EU} \end{cases} \quad (3)$$

式中： T_{EOT} 为系统停运时间； μ_{EU} 和 μ_{EA} 分别为能

量可用率和能量不可用率; P_S 为系统额定容量; L_S 为失负荷量; $P(x)$ 为第 x 个子系统停运容量。

文献[22]以柔性直流输电系统 MMC 换流阀为研究对象, 综合分析子模块、控制保护系统以及阀冷系统等部件的关联关系; 并以故障树分析方法为基础, 建立了 MMC 换流阀可靠性分析数学模型, 实现了系统薄弱环节的辨识。然而, 所提方法有较强的数据依赖性, 所统计的数据不全或质量不高均会导致可靠性计算不准确。此外, 所构建的模型假设运行工况对可靠性的影响是线性的, 并未说明该假设对系统可靠性分析的适用性及局限性。文献[23]首先基于柔直换流阀子模块半桥结构进行分析, 构建了考虑器件失效率的换流阀可靠性数学模型。其次, 对 MMC 换流阀各类故障进行了分类, 基于各类故障之间的关联关系, 构建了换流阀故障树模型, 采用下行法获取到最小割集 B_i , 如式(4)所示。虽然故障树的构建受主观经验影响, 可靠性计算量也较大。

$$B_i = \begin{cases} \{X_i\} \\ \{X_i, X_j, \dots, X_m\} \end{cases} \quad (4)$$

式中: X_i 、 X_j 和 X_m 为底事件; i, j 和 m 分别为底事件的编号。

故障模式及影响分析法^[24](failure mode and effects analysis, FMEA)是一种可用于分析系统基本单元故障及其所造成影响的方法^[25]。图 8 展示了 FMEA 方法的基本分析流程, 主要包括资料搜集、故障模式分类、填写系统的故障模式与影响分析表等。

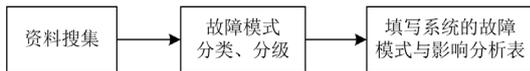


图 8 故障模式与影响分析步骤

Fig. 8 Failure mode and effects analysis steps

文献[25]基于故障模式和影响分析法, 使用事件树方法和最小割集方法来表示系统的运行情况, 并推导出相应的系统故障模式。针对被分析的每个输出节点, 对每个输出节点进行可靠性指标及特定区域概率与频率的计算。该方法有助于识别系统潜在故障模式, 但对大型系统而言, 会涉及到复杂的故障模式分析, 且需要获取大量的历史数据和系统参数。

采用手册法分析高压直流输电系统可靠性时, 会受数据统计量的大小、数据准确性等因素制约, 仅能分析系统的静态可靠性, 难以对系统状态进行动态描述。因此, 在未来的研究中, 需做好数据的收集与管理, 以确保统计数据完整性和准确性, 并探索适用于描述高压直流输电系统动态性与复杂

性的可靠性建模方法。

2.3 状态空间法

基于状态空间的可靠性分析法主要以马尔可夫过程为理论依据, 通常将研究对象视为可修复系统。该方法通常由系统的状态定义、状态转移图构建、方程组构建、可靠性求解等步骤组成。

马尔可夫过程(Markov process)^[27]是一种无后效性的随机过程, 常用于评估简单系统的可靠性^[28]。主要以状态空间图为基础对高压直流输电系统的可靠性进行计算^[29]。图 9 为基于马尔可夫过程的可靠性指标的基本求解步骤。

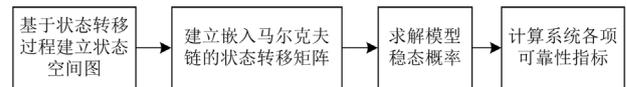


图 9 马尔可夫过程求解

Fig. 9 Markov process solution

文献[30]基于系统运行过程中的历史数据, 构建可对系统进行描述的状态转移矩阵, 并通过状态转移矩阵和当前系统状态求解未知时间内各类可靠性指标, 如转移概率、平稳概率等。而文献[31]则对多种固态断路器结构进行了分析, 并基于故障树法对各类故障进行了分类。其次, 以马尔可夫过程为理论基础, 形成了考虑运行状态的机械式高压直流断路器状态转移模型, 建立式(5)所示的 Chapman-Kolmogorov 方程, 并进一步对可靠性指标进行求解。此外, 分析了系统可靠性与冗余度之间的影响关系, 并对系统薄弱环节进行了辨识。所提方法可描述直流断路器的状态转移过程, 对可靠性进行定量评估, 具有较好的扩展性。然而, 该方法需要对系统的复杂性和动态特性进行简化, 从而降低了模型的准确度。同时, 所提方法还会受到参数不确定性的影响, 如系统状态转移概率等模型参数的不确定性会对可靠性分析造成一定的影响。

$$P_{i_trans}(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^n (P_j(t)\lambda_{ji}) - \sum_{j=1, j \neq i}^n (P_i(t)\lambda_{ij}) \quad (5)$$

式中: λ_{ij} 为从状态 i 转移到状态 j 的概率; $P_i(t)$ 为系统模型在时间 t 状态 i 时的概率。

文献[32]基于高压输电线路继电保护装置系统状态分析, 总结了由保护装置导致的风险类别, 在状态划分的基础上构建了 Markov 可靠性模型。然而, 对于所提到的“风险”概念与“可靠度”的区别, 并未作出说明。此外, 该方法通过增加系统状态扩展 Markov 模型, 虽在一定程度上提升了模型精度, 但也会引入新的系统参数, 增加了可靠性计算量。文献[33]对系统核心构成以及各类故障进行了分

析,并根据功能差异对系统进行划分。基于马尔可夫过程相关理论,建立了考虑多状态转移的柔性直流输电系统可靠性分析组合模型。与传统状态穷举法相比,该方法在很大程度上减小了计算难度。

然而,马尔可夫过程也存在一定的局限性,主要用于指数分布场合。因此,有学者提出了半马尔可夫模型,该模型适用于复杂动态系统的可靠性分析,是马尔可夫过程的延伸,在分析系统可靠性时具有更强的适用性。如文献[34]基于 Semi-Markov 思想,构建了 MMC 可靠性模型。对 MMC 工作原理及核心部件的备用状态进行了分析,建立了基于 Semi-Markov 的 MMC 可靠性数学模型,分析了不同冗余条件下的可靠性变化情况。为提升系统可靠性、降低损耗,采用了多目标优化方法对冗余度进行调整。图 10 和图 11 分别展示了冗余度对系统可靠性及损耗的影响关系。

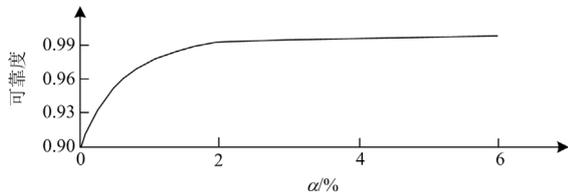


图 10 冗余度和可靠性关系

Fig. 10 Relationship between redundancy and reliability

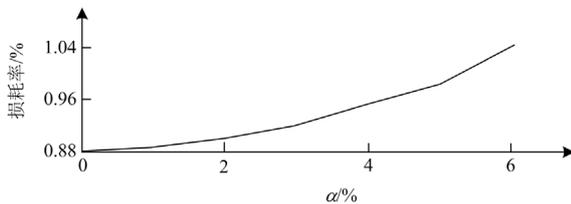


图 11 冗余度和损耗率的关系

Fig. 11 Relationship between redundancy and loss rate

对图 10 进行分析可知,当冗余度为 0%~2%时,随着冗余度的增加,系统可靠度呈明显上升趋势,约为 9%,表明冗余模块发挥了作用;而当冗余度为 2%~6%时,可靠度呈缓慢上升趋势,约为 0.6%,此过程中可靠性几乎不受冗余度的影响。图 11 为损耗率随冗余度的变化情况,通过分析可以发现,损耗率随着冗余度的增加而增大,并呈现出类二次曲线的形状,损耗率由 0.88%增至 1.04%。对比图 10 和图 11 可知,当冗余度超过 2%时,系统可靠度提升不明显,但损耗率呈二次增长趋势。

频率和持续时间法是高压直流输电系统可靠性分析的基本方法,主要采用 Markov 过程对系统进行建模分析,通常需要建立状态空间图以探讨状态概率、状态频率与状态持续时间之间的关系^[35]。图

12 为典型的直流输电系统状态空间图,基于此可建立高压直流输电系统状态转移模型,并对系统可靠性进行分析。如文献[36]提出一种改进的 FD 法,解决了传统 FD 法在分析高压直流输电系统可靠性时存在计算量大、复杂度高问题。该方法将所有拟分析的子系统核心参数进行矩阵化,避免建立复杂的状态空间。然而,并未说明该方法的改进依据及其与传统 FD 法间的关系,也未给出可靠性计算精度的验证方法。

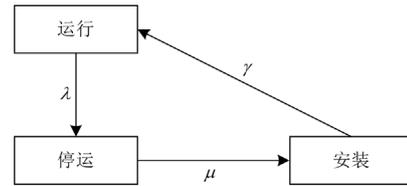


图 12 系统状态空间图

Fig. 12 State space diagram of system

状态枚举法^[37]主要用于分析系统模型稳态解,多用于高压直流输电系统可靠性建模领域。该方法主要包括状态选择与分析、可靠性指标计算、累计指标修正、迭代求解等步骤。文献[38]对混合多端特高压直流输电系统运行方式进行了分析,采用“分而治之”的思想进行可靠性子系统划分,并建立了基于状态枚举法的多端系统可靠性分析模型,实现了系统的可靠性灵敏度分析。文献[39]考虑了高压直流输电系统运行模式和配置特征,结合子系统之间的可靠性逻辑关系,构建了子系统的可靠性评估模型,并提出基于状态枚举法的系统可靠性评估方法。状态枚举法在分析系统可靠性时可列举出所有可能的状态。然而随着系统复杂度的增加,其状态数量会呈指数级增长,导致可靠性计算量急剧增大。

状态空间法在一定程度上可实现系统的动态分析,但也存在状态空间爆炸的问题。对于复杂系统而言,需要构建的状态空间也会非常复杂,进而导致可靠性求解的复杂度增加。因此,可采用适当的近似手段或状态合并的方式对状态空间进行简化,从而降低可靠性计算的难度。

2.4 其他方法

除以上统计法、手册法及状态空间法外,本文还综述了几种应用于高压直流输电系统可靠性分析的其他方法,包括蒙特卡洛法、GO 法、贝叶斯网络法及卷积法等。

其中,蒙特卡洛模拟法^[40-41]是一种利用随机数对事件进行模拟的方法,被广泛地应用于大规模数学问题计算、随机过程场景模拟、可靠性评估等^[42]

领域, 其也可应用于高压直流输电系统的可靠性分析, 通常需要先构建可靠性模型, 然后基于蒙特卡洛法对系统模型进行随机抽样, 从而实现系统可靠性的求解。如文献[43]提出基于序贯重要抽样的高压直流输电系统可靠性计算方法, 该方法将序贯蒙特卡洛模拟法与重要抽样法进行组合, 充分利用系统参数对可靠性进行评估, 保证了系统运行时序信息的真实性, 减小了抽样方差, 提高了计算速度。文献[44]主要对高压直流输电系统的故障机理进行了分析, 基于维修和备用关联关系构建了考虑系统多状态的故障树模型。此外, 采用改进的蒙特卡罗方法进行模拟, 实现了系统可靠度和不可靠度等指标的求解。蒙特卡洛法主要是通过大量的随机抽样, 实现系统真实状态的模拟, 在处理复杂的概率分布问题时, 具有一定的精度优势。尽管大量的随机抽样可在一定程度上提升计算的精度, 降低随机误差, 但也会降低计算速度。

GO 法^[45]为以成功为导向的分析方法, 将系统元件或子系统以 GO 图的形式呈现出来, 可有效分析系统内在逻辑关系, 该方法最早由美国 Kaman 公司提出, 并在可靠性分析领域得到广泛应用^[46]。基于 GO 方法的可靠性分析主要包括 5 个步骤: 1) 系统定义; 2) 边界确定; 3) GO 图构建; 4) GO 运算; 5) 可靠性评价, 如图 13 所示。

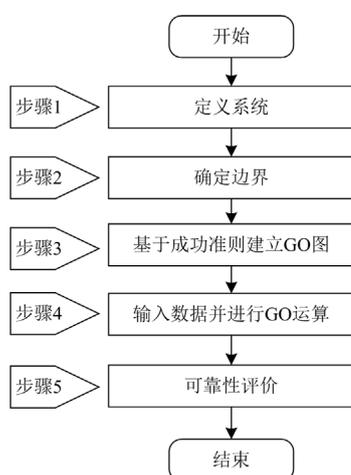


图 13 GO 法分析过程

Fig. 13 Analysis process of GO method

如文献[47]探讨了 GO 法在特高压直流输电系统可靠性分析中的应用。首先, 阐述了 GO 法的基本原理, 并对可靠性特征量、系统操作符等进行介绍。其次, 分析了系统各组成部分的连接关系, 构建了特高压直流输电系统 GO 模型, 推导了系统串联结构等效数学模型, 从而实现了考虑部件组合相

关性的特高压直流输电系统可靠性分析。与传统可靠性分析方法相比, GO 法具有更加清晰简洁的建模思路, 能直观展现系统行为和结构, 并可定量分析系统的稳态可靠性。然而, 该方法对模型精度要求较高, 且需要大量统计数据, 在动态系统的可靠性分析方面不太适用。

贝叶斯网络法^[48](bayesian network, BN)是一种将事件发生的内在影响关系与概率理论进行融合的图形化网络方法, 可有效处理定量或定性信息, 并对系统故障模式及其相互依赖关系进行描述^[49]。如文献[50]针对传统贝叶斯网络 GO 法在分析复杂系统时存在的适用性差、计算精度低的缺点, 对网络模型的映射规则进行了改进, 提出了贝叶斯网络推理方法; 通过对系统结构进行分析, 建立了考虑系统串、并联相关性的可靠性模型, 从而解决了传统方法可靠性计算精度低的问题。文献[51]主要采用多状态节点的贝叶斯网络对系统进行描述, 构建了考虑双极运行、单极运行及双极停运 3 个状态的模型, 并基于元件备用, 构建了输电系统贝叶斯网络模型。所提方法能够有效描述系统多态性与故障间的关系, 评估系统薄弱环节, 并实现系统状态的预判。典型的贝叶斯网络模型表示为

$$P(B_i | A) = \frac{P(B_i)P(A|B_i)}{\sum_{i=1}^N P(B_i)P(A|B_i)} \quad (6)$$

式中: $P(B_i)$ 为系统元件基础概率; $P(A|B_i)$ 为事件 B_i 发生的条件下, 事件 A 发生的概率; $P(B_i | A)$ 为事件 A 发生的条件下, 事件 B_i 发生的概率。

文献[52]以换流站主要电气接线分析为基础, 定义了各类元件的等效状态类型, 实现了可靠性数学模型的构建。为减小系统可靠性计算的复杂度, 提出了主接线分区设计法。分析了 GO 法与 FDBN 法之间的映射关系, 对二者进行结合, 建立系统可靠性模型, 实现了可用度、不可用度等可靠性参数的求解。虽然所提方法能在一定程度上减小可靠性计算量, 但并未对所构建模型的准确性进行验证。而文献[53]则考虑了柔直换流站的实际运行工况, 对文献[52]中的等效二状态可靠性数学模型进行了改进, 提出了考虑检修状态的静态、动态元件三状态模型。为解决系统元件众多导致可靠性分析复杂度高的难题, 提出了元件分区设计思路, 并建立了 GO 法与 BN 法相结合的系统可靠性模型。该模型可反映系统变量间的作用关系及其随时间的变化规律, 其表达式为

$$P(B_{t+k\Delta t}^h) = \prod_{h=1}^H P(B_t^h | A_t^h) + \prod_{k=1}^K \prod_{h=1}^H P(B_{t+k\Delta t}^h | A_{t+k\Delta t}^h) P(A_{t+k\Delta t}^h | A_t^h) \quad (7)$$

式中： H 为系统总结点数； t 为初始时间； Δt 为时间间隔； k 为时间间隔的个数； K 为最大时间间隔的个数； A_t^h 、 B_t^h 分别为 t 时刻第 h 个节点的父节点、子节点； $A_{t+k\Delta t}^h$ 、 $B_{t+k\Delta t}^h$ 分别为 $k\Delta t$ 个时间间隔后的转移网络中第 h 个节点的父节点、子节点。

文献[53]所求的系统不可用度随时间的变化曲线如图 14 所示，主要描述了不考虑检修的二状态模型和考虑检修的三状态模型下系统不可用度随时间的变化情况。从图 14 可以看出，不考虑设备检修的二状态模型的系统不可用度曲线高于三状态模型的不可用度曲线。不考虑检修的二状态模型的不可用度到达稳态时为 0.0022，而考虑检修的三状态模型稳态时的不可用率为 0.0013。等效二状态模型只是简单地将系统的运行状态视为“正常运行状态”或“故障停运状态”，忽略了系统检修状态的影响。因此，在可靠性建模中引入电气设备的检修状态，可以在一定程度上提高系统可靠性评估结果的准确性。采用贝叶斯网络法分析高压直流输电系统可靠性具有建模难度小、适用于动态系统可靠性分析等优势。然而，该方法通常需要大量的数学推导，对于复杂系统而言，计算量也会增大。

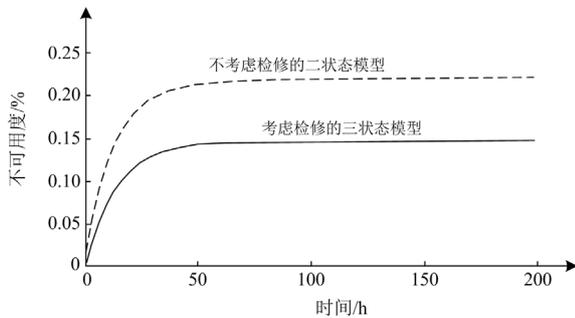


图 14 系统不可用度变化曲线

Fig. 14 System unavailability change curve

卷积神经网络^[54-55](convolutional neural network, CNN)是一类用于分析网络结构数据的神经网络，在复杂电力网络的可靠性分析及故障诊断领域中得到应用。如文献[56]采用核密度估计法优化了系统概率模型，基于半不变量法对最大负载能力与负荷间的概率分布进行了卷积运算。当负荷波动特性发生变化后，对其中相应的随机变量进行卷积计算，能在一定程度上减小系统可靠性计算的复杂度。此外，文献[57]针对输电系统可靠性分析中输电能力计算

模型的缺陷，以最优负荷为目标，建立了系统在特定状态下的优化模型，并利用对偶算法对模型进行求解；同时，基于马尔可夫链构建输电能力概率-频率分布函数，并对负荷的概率-频率分布函数进行了卷积运算，从而实现了系统可靠性参数的求解。卷积神经网络法在分析系统可靠性时具有较强的数据提取能力，可对系统故障模式进行分类，且具有较快的处理速度。然而，该方法通常需要大量的系统训练数据作为支撑，若训练数据量不足可能导致可靠性分析结果不准确。

本节主要从统计法、手册法、状态空间法及其他方法入手，综述了当前较为主流的高压直流输电系统可靠性分析方法。其中，统计法具有计算简单、输入参数易于获取等优势，但难以对系统的动态过程进行描述，主要应用于高压直流输电系统工程领域；手册法主要通过查找可靠性参数统计手册，获取故障率、修复率等历史统计参数，并基于可靠性框图、故障树等逻辑分析理论建立可靠性模型，可定性或定量地分析系统的可靠性。可靠性框图法及故障树法主要用于描述系统可靠性逻辑结构，故障模式与影响分析法则通常应用于单个故障模式对系统可靠性或性能的影响分析；而状态空间法是以系统元件或子系统为基础，并结合了马尔可夫过程相关理论构建可靠性模型，主要用于系统状态及转移过程的动态描述，但对于复杂系统而言，状态空间的建立及求解难度较大；此外，文章还阐述了几种其他方法，如蒙特卡洛法、GO 法、贝叶斯法及卷积法等，这些方法均以概率和统计理论为基础，需要通过大量的模拟抽样或复杂数学运算来实现系统状态分析或可靠性评估，通常适用于不确定性或随机性较大的系统。

3 可靠性分析在柔直系统中的应用

柔性直流输电系统在当下电力系统中发挥了重要作用，不仅能提高电网的稳定性及供电的可靠性，还能实现分布式能源的接入和异步电网的互联。因此，对柔性直流输电系统的可靠性分析具有重要意义。与传统直流输电系统可靠性分析不同，柔性直流输电系统的可靠性分析对象通常为换流阀或其中关键器件。如文献[58]提出了一个考虑电力脉冲调制的 MMC 可靠性数学模型。该模型由可靠性函数推导得到，并基于等效故障率和强迫停运率等可靠性指标进行描述。此外，所提方法基于 $k/n(G)$ 思想，构建了考虑系统子模块冗余情况的可靠性模型，分析了子模块冗余度及运维时间对换流阀系统可靠性的影响。文献[59]主要以 VSC-HVDC 换流阀主电路

拓扑及换流阀结构分析为基础, 进一步阐述了换流阀中关键部件的重要性, 基于 $k/n(G)$ 理论探讨了冗余系统的可靠性建模问题。并基于马尔科夫过程, 建立换流阀可靠性模型, 对系统失效状态进行了动态描述。文献[60]以 MMC 中核心器件可靠性为分析基础, 考虑了系统子模块冗余情况, 基于可靠性框图构建系统级可靠性分析模型, 列写了考虑子模块冗余的可靠度函数, 分析了不同冗余条件下的系统可靠性。

文献[61]假设系统元件均处于寿命历程中的稳定运行状态, 建立了从 MMC 子模块到整个系统的可靠性计算模型, MMC 换流阀核心子单元组合关系如图 15 所示。通过算例分析了器件冗余、模块备用等对系统可靠性的影响。所提方法在考虑子模块冗余度的情况下, 分析了主动策略和被动策略下可靠度随时间的变化趋势, 如图 16 所示。由图 16 可知, 主动策略和被动策略均能有效提升系统可靠性。相比之下, 被动策略比主动策略在可靠性提升方面效果更佳。在主动策略下, 桥臂运行子模块会对电

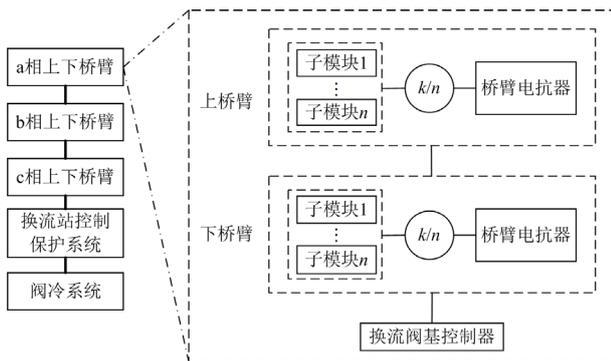


图 15 换流阀可靠性框图

Fig. 15 Reliability block diagram of converter

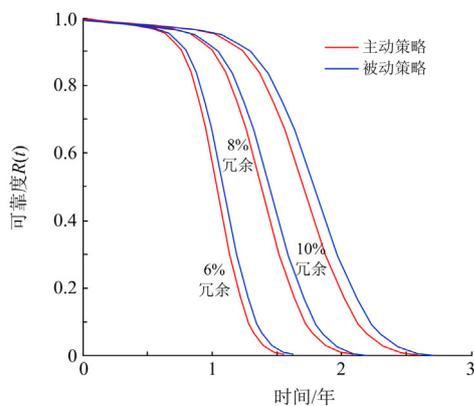


图 16 考虑不同备用策略的 MMC 可靠度曲线

Fig. 16 Reliability curve of MMCs with different redundancy strategies

压及环流造成一定的影响; 而被动策略冗余模块通常在其他模块发生故障时才投入使用, 且对控制策略具有较高的要求。因此, 在工程实践中, 需要权衡系统可靠性与控制要求之间的关系, 并选择适当的备用方式。

电力电子器件作为柔性直流输电系统换流阀的重要组成部分, 对于整个系统的正常运行起着至关重要的作用。在常规的可靠性分析过程中, 器件仅以故障参数形式参与到整个系统的可靠性计算中。事实上, 对于单个器件本身的可靠性分析也是柔性直流系统可靠性分析的重要环节, 现有研究均以 IGBT 的可靠性分析为主, 但相关研究较少, 主要通过构建基于失效机理的器件寿命模型或基于老化数据的数学解析模型分析其可靠性。

文献[62]分析了半导体器件的循环功率对热机械应力造成的影响, 并探讨了所选寿命模型对寿命预测的影响。同时, 还对寿命模型的适用性与局限性做了进一步的分析。文献[63]对换流阀核心器件寿命累计损伤进行了计算, 发现基频结温的变化会对器件可靠性产生影响。因此, 将基频结温考虑在内可提升计算的准确性。除此之外, 基于 MMC 系统器件的累计损伤情况, 分析了器件的退化模型参数及其波动特性, 并采用蒙特卡洛随机抽样方法建立了器件寿命分布模型, 实现了器件失效概率的求解。

综上所述, 目前柔性直流输电系统在可靠性分析时存在如下挑战: 其一, 作为柔性直流输电系统换流阀的核心单元, 电力电子器件在运行过程中会承受电热应力的循环冲击, 其可靠性会遭受严重威胁。因此, 电力电子器件运行可靠性对系统可靠性的影响难以量化分析; 其二, 随着柔性直流输电系统电压等级的提高, 换流阀子模块数量越来越多, 增加一定数量的冗余子模块可以有效提升整体系统的可靠性, 但导致系统成本增加, 因此, 系统子模块冗余、系统可靠性及成本之间的关系为难以建立; 其三, 由于柔性直流输电系统正朝多端结构方向发展, 相比两端柔性直流输电系统具有更加复杂的组成, 且将呈现出更复杂运行状态。因此, 多运行状态下的多端柔性直流输电系统可靠性模型难以构建。

4 结论与展望

4.1 结论

不同的可靠性评估方法优缺点各异, 在实际应用时需要各种方法作进一步综合分析评估, 并详细对比各类方法的优势和劣势, 有针对性地选择

合适的系统可靠性分析方法。基于前文所述的可靠性分析方法可以得到如下结论。

1) 当前直流输电系统中常用的可靠性指标主要包括故障率、能量不可用率、停运率、灵敏度可靠度等。其中, 能量不可用率、停运率通常是工程领域最具代表性的可靠性指标, 往往可基于时间参数直接计算得到, 多用于系统级对象的可靠性求解。而故障率、灵敏度及可靠度等指标在工程领域应用相对较少。

2) 传统直流输电系统在分析可靠性时, 通常从设备层面到系统层面进行可靠性建模, 较少从设备内部的器件层面进行分析, 主要基于历史运行数据对系统可靠性进行静态分析, 较少研究系统核心组成的退化进程。与传统直流输电系统不同, 柔性直流输电系统在分析可靠性时, 更深层次地分析器件失效机理, 建立了器件层面的退化模型, 有利于系统可靠性的精准建模及动态分析。

3) 在工程领域, 统计法是应用最广泛的可靠性分析方法, 而手册法、状态空间法等则应用较少。一方面, 主要是由于运用这些方法时需要基于大量的历史运行数据统计, 且构建可靠性模型的难度较大; 另一方面, 随着柔性直流输电系统朝着多端结构发展, 系统运行复杂度也越来越高, 呈现多运行状态特征, 使得系统建模更加复杂。

4.2 展望

随着高压直流输电技术的迅速发展, 工程实践规模不断扩大, 系统复杂度也日益提升, 因此, 未来高压直流输电系统可靠性分析也将面临更多的挑战。针对高压直流输电系统可靠性分析提出展望思考。

1) 挑选具有代表性的分析指标。在工程实践中, 系统可靠性分析指标多采用基于时间参数的数据进行求解; 而在学术研究中, 多采用失效率、维修率等参数进行计算。因此, 在工程界和学术界可以选出具有代表性的可靠性分析指标。

2) 权衡模型精度和求解速度。基于可靠性指标对系统的可靠性进行建模分析时, 不可一味地追求精度而忽略计算速度或者追求速度而忽略精度, 可进一步研究模型精度与其求解速度之间的关系, 使二者均能达到最优化。

3) 基于器件老化分析系统可靠性。目前高压直流输电系统未充分考虑器件老化对其可靠性的影响, 可进一步分析在器件疲劳老化的作用下, 电力电子装置可靠性变化及其对整个输电系统的影响。

4) 分析多端互联系统可靠性。现有研究中较少涉及多端输电系统的可靠性分析方法, 如多端柔性

直流输电系统中有单个或多个换流站停运时, 会对整体系统的稳定产生何种影响, 也是后续研究考虑的问题。

5) 构建多维度可靠性评估体系。现有平台主要以系统各部件电热状态监测数据为基础, 构建相应的系统可靠性分析模型, 未来也可将时间参数、故障率及维修率等指标考虑在内, 构建多维度的系统可靠性评估体系。

6) 修订直流输电系统可靠性评价规程。现有可靠性评价规程不适用于多端柔性直流输电系统可靠性分析。未来可基于多端系统的运行方式分析, 对可靠性评价规程做进一步修订。

参考文献

- [1] 李新民. 2022 年中国能源大事记[N]. 经济参考报, 2022-12-28 (007).
LI Xinmin. 2022 China energy milestones[N]. Economic Reference News, 2022-12-28 (007).
- [2] 陈凡, 张继聪, 赵美莲, 等. 考虑负荷重分配攻击的电力系统运行可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(8): 160-168.
CHEN Fan, ZHANG Jicong, ZHAO Meilian, et al. Reliability evaluation of power system operation considering load redistribution attacks[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8): 160-168.
- [3] 周孝信, 卢强, 杨奇逊, 等. 中国电气工程大典第 8 卷 电力系统工程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [4] 罗琴, 李丹, 潘广泽, 等. 中国柔性直流输电系统可靠性标准需求研究[J]. 南方电网技术, 2022, 16(2): 121-129.
LUO Qin, LI Dan, PAN Guangze, et al. Requirements analysis on reliability standards for flexible DC transmission system in China[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(2): 121-129.
- [5] 黄莹, 谢开贵, 黎小林, 等. ± 800 kV 直流输电系统可靠性综合分析系统[J]. 南方电网技术, 2013, 7(6): 19-23.
HUANG Ying, XIE Kaigui, LI Xiaolin, et al. A comprehensive analysis system of ± 800 kV DC transmission system's reliability[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(6): 19-23.
- [6] 张玉莹, 范小克, 孙博, 等. 计及可靠性的城市配电网中公交枢纽多层优化规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 25-36.
ZHANG Yuying, FAN Xiaoke, SUN Bo, et al. Multi-level optimization approach for public transport hub allocation in urban distribution systems considering reliability[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 25-36.
- [7] 廖基定, 吴锦标, 刘再明, 等. 基于马尔可夫到达过程的并联可修系统的可靠性分析[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(6): 1040-1046.
LIAO Jiding, WU Jinbiao, LIU Zaiming, et al. Reliability

- analysis of a parallel repairable system based on Markov arrival process[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2010, 30(6): 1040-1046.
- [8] 任震, 黄雯莹, 冉立. 高压直流输电系统可靠性评估[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
- [9] 谢开贵. 超(特)高压直流输电系统可靠性评估、优化及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [10] 刘泽洪, 郭贤珊. 高压大容量柔性直流换流阀可靠性提升关键技术研究与应用[J]. *电网技术*, 2020, 44(9): 3604-3613.
LIU Zehong, GUO Xianshan. High-voltage large-capacity VSC valve reliability enhancement[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(9): 3604-3613.
- [11] 直流输电系统可靠性评价规程: DL/T 989—2005[S]. Code for reliability evaluation of DC transmission systems: DL/T 989—2005[S].
- [12] CHEN Hao, YANG Fan, XU Lijun, et al. Reliability analysis of a switched reluctance starter/generator[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2024, 9(1): 112-121.
- [13] LUO W, WEI O, WAN H. SATMCS: an efficient SAT-based algorithm and its improvements for computing minimal cut sets[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2021, 70(2): 575-589.
- [14] GHOSH B, CHAKRABORTY A K, BHOWMIK A R. Reliability and efficiency enhancement of a radial distribution system through value-based auto-recloser placement and network remodelling[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023, 8(1): 1-14.
- [15] GUO J, WANG X, BIE Z, et al. Reliability modeling and evaluation of VSC-HVDC transmission systems[C] // 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition, July 27-31, 2014, National Harbor, MD, USA.
- [16] 徐攀腾, 喻文翔, 朱博, 等. 基于特性参数矩阵的混合多端直流系统可靠性分析[J]. *南方电网技术*, 2022, 16(2): 111-120.
XU Panteng, YU Wenxiang, ZHU Bo, et al. Reliability analysis of hybrid multi-terminal DC system based on characteristic parameter matrix[J]. *Southern Power System Technology*, 2022, 16(2): 111-120.
- [17] 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 optimization design of the main circuit within HVDC thyristor valve[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(S1): 39-43.
- [18] KANG F S, SONG S G. Life-cycle expectation using fault-tree analysis for improved hybrid submodule in HVDC system[J]. *Electronics*, 2021, 10(2): 1-20.
- [19] HANES J, WIEGAND R P. Analytical and evolutionary methods for finding cut volumes in fault trees constrained by location[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2019, 68(4): 1214-1226.
- [20] 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.
- [21] 郑传材, 管霖. 基于子系统划分的直流输电系统可靠性模型[J]. *中国电力*, 2010, 43(2): 21-25.
ZHENG Chuancai, GUAN Lin. Research on reliability model of HVDC based on subsystems division[J]. *Electric Power*, 2010, 43(2): 21-25.
- [22] 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.
- [23] 李鹏坤, 王跃, 吕高泰, 等. 柔直换流阀可靠性研究及提升指标分析[J]. *电力电子技术*, 2021, 55(12): 55-59, 68.
LI Pengkun, WANG Yue, LÜ Gaotai, et al. Reliability research and improvement index analysis of converter valve[J]. *Power Electronics*, 2021, 55(12): 55-59, 68.
- [24] WANG Z, GAO J M, WANG R X, et al. Failure mode and effects analysis by using the house of reliability-based rough VIKOR approach[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2018, 67(1): 230-248.
- [25] HUANG J, XU D H, LIU H C, et al. A new model for failure mode and effect analysis integrating linguistic z-numbers and projection method[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2021, 29(3): 530-538.
- [26] DIALYNAS E N, KOSKOLOS N C. Reliability modeling and evaluation of HVDC power transmission systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1994, 9(2): 872-878.
- [27] ZHANG Hanjun, ZHU Yixia. Existence of quasi stationary distributions for continuous time Markov processes[J]. *Journal of Xiangtan University (Natural Science Edition)*, 2022, 44(3): 21-27.
- [28] ZHANG L, ZHANG D, HUA T, et al. Reliability evaluation of modular multilevel converter based on Markov model[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2019, 7(5): 1355-1363.
- [29] ZHANG K, CAO H. Reliability analysis of heat exchanging system of deep-sea manned submersibles using Markov model[J]. *Quality Engineering*, 2021, 33(3): 487-496.
- [30] LEELARUJI R, SETREUS J, OLGUIN G, et al. Availability assessment of the HVDC converter transformer system[C] // Proceedings of the 10th International Conference on

- Probabilistic Methods Applied to Power Systems, May 25-29, 2008, Rincon, PR, USA.
- [31] 赵书涛, 王波, 华回春, 等. 基于马尔科夫模型的直流断路器可靠性评估方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊 1): 126-132.
ZHAO Shutao, WANG Bo, HUA Huichun, et al. Reliability evaluation method of DC circuit breaker based on Markov model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 126-132.
- [32] 薛安成, 罗麟, 景琦, 等. 基于 Markov 模型的高压输电线路继电保护装置风险评估[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1995-2000.
XUE Ancheng, LUO Lin, JING Qi, et al. Research on Markov model based risk assessment of protective relaying for high voltage transmission line[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1995-2000.
- [33] 李生虎, 赵慧洁, 周慧敏, 等. 基于可靠性灵敏度的 UHVDC 系统预防性检修优化[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 68-75.
LI Shenghu, ZHAO Huijie, ZHOU Huimin, et al. Reliability sensitivity-based optimization for a UHVDC transmission system with preventive maintenance[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 68-75.
- [34] 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 Shoudao, FU Xueting, RAO Hong, et al. Reliability analysis and redundant configuration strategy of MMC based on Semi-Markov[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 128-133.
- [35] LIU G. A frequency-duration time (FD) and Monte Carlo based hybrid approach for the evaluation of nodal price and nodal reliability indices[J]. Electric Power Science & Engineering, 2012.
- [36] 郭静丽, 王秀丽, 侯雨伸, 等. 基于改进 FD 法的柔性直流输电系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 8-13.
GUO Jingli, WANG Xiuli, HOU Yushen, et al. Reliability assessment of the VSC-HVDC transmission system based on a modified FD method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 8-13.
- [37] ZHENG Z, WANG Y, LI C, et al. Reliability model and algorithm research on HVDC system and flexible HVDC system[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(16): 2621-2624.
- [38] 李凌飞, 胡博, 黄莹, 等. 混合多端特高压直流输电系统可靠性评估[J]. 南方电网技术, 2018, 12(11): 73-83.
LI Lingfei, HU Bo, HUANG Ying, et al. Reliability evaluation of hybrid multi-terminal UHVDC transmission system[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(11): 73-83.
- [39] XIE K, HU B, SINGH C. Reliability evaluation of double 12-pulse ultra HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 210-218.
- [40] 王艳苹, 李威. 蒙特卡罗模拟法的发输电系统可靠性评估分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(9): 165-167.
WANG Yanping, LI Wei. Reliability evaluation analysis of power generation and transmission systems using Monte Carlo simulation[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2022, 12(9): 165-167.
- [41] 周子强, 胡昆, 汪星雨, 等. 基于蒙特卡洛模拟的变电运行状态监测系统设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2023(7): 174-177.
ZHOU Ziqiang, HU Kun, WANG Xingyu, et al. Design of substation operational status monitoring system based on Monte Carlo simulation[J]. Automation & Instrumentation, 2023(7): 174-177.
- [42] FARIAS J V M, CUPERTINO A F, DE NAZARETH FERREIRA V, et al. Reliability-oriented design of modular multilevel converters for medium-voltage STATCOM[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(8): 6206-6214.
- [43] BILLINTON R, SANKARAKRISHNAN A. Adequacy assessment of composite power systems with HVDC links using Monte Carlo simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(3): 1626-1633.
- [44] 华回春, 章煜. 序贯重要抽样法在高压直流输电系统可靠性评估中的应用研究[J]. 广西电力, 2019, 42(5): 13-18.
HUA Huichun, ZHANG Yu. Application of a sequential importance sampling method for the reliability evaluation of HVDC transmission system[J]. Guangxi Electric Power, 2019, 42(5): 13-18.
- [45] 韩富春, 赵珂, 李春叶. 基于 GO 法的电气主接线可靠性评估[J]. 电气技术, 2010, 121(3): 18-21.
HAN Fuchun, ZHAO Ke, LI Chunye. Reliability evaluation of main electric wiring based on the GO methodology[J]. Electrical Engineering, 2010, 121(3): 18-21.
- [46] YE T, ZHOU Y, CHEN A, et al. Extend GO methodology to support common-cause failures modeling explicitly by means of Bayesian Networks[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2020, 69(2): 471-483.
- [47] 张雪松, 王超, 常勇, 等. GO 法在特高压直流输电可靠性研究中的应用[J]. 高电压技术, 2009, 35(2): 236-241.
ZHANG Xuesong, WANG Chao, CHANG Yong, et al. Reliability analysis of UHVDC system by the GO methodology[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(2): 236-241.
- [48] CAI B, KONG C, LIU Y, et al. Application of Bayesian networks in reliability evaluation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(4): 2146-2157.

- [49] TOURGOUTIAN B, YANUSHKEVICH A, MARSHALL R. Reliability and availability model of offshore and onshore VSC-HVDC transmission systems[C] // 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, February 10-12, 2015, Birmingham, UK.
- [50] 田录林, 刘沛盛. 改进贝叶斯网络 GO 法在高压直流输电系统的可靠性分析[J]. 高压电器, 2017, 53(7): 53-59.
TIAN Lulin, LIU Peisheng. Reliability analysis on HVDC transmission system based on improved Bayesian networks GO methodology[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(7): 53-59.
- [51] 陈碧云, 任震, 李红宁. 基于多状态节点贝叶斯网络的 HVDC 系统可靠性评估[J]. 继电器, 2005, 33(20): 62-66, 83.
CHEN Biyun, REN Zhen, LI Hongning. Reliability evaluation for HVDC systems based on Bayesian network with multi-state nodes[J]. Relay, 2005, 33(20): 62-66, 83.
- [52] 束洪春, 赵红芳, 张旭, 等. 昆柳龙混合直流工程送端换流站电气主接线可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 115-123.
SHU Hongchun, ZHAO Hongfang, ZHANG Xu, et al. Reliability analysis of main electrical connection for sending-end converter station in Kunliulong hybrid DC project of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 115-123.
- [53] 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.
- [54] LAN S, CHEN M J, CHEN D Y. A novel HVDC double-terminal non-synchronous fault location method based on convolutional neural network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(3): 848-857.
- [55] BILLINTON R, FOTUHI-FIRUZABAD M, FARIED S O. Reliability evaluation of hybrid multiterminal HVDC subtransmission systems[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(5): 571-577.
- [56] CHEN X, LI H, WANG G, et al. A convolution power-based protection scheme for hybrid multiterminal HVDC transmission systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 9(2): 1655-1667.
- [57] 祝锦舟, 张焰, 王赛一, 等. 基于传输点容量模型的输电系统可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2018, 33(1): 92-103.
ZHU Jinzhou, ZHANG Yan, WANG Saiyi, et al. A method for composite power system reliability evaluation based on delivery point capability model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(01): 92-103.
- [58] WANG B, WANG X, BIE Z, et al. Reliability model of MMC considering periodic preventive maintenance[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1535-1544.
- [59] 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, 41.
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, 41.
- [60] ZADKHAHAST S, FOTUHI-FIRUZABAD M, et al. Reliability evaluation of an HVDC transmission system tapped by a VSC station[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1962-1970.
- [61] 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.
- [62] YI Z, WANG H, WANG Z, et al. Impact of lifetime model selections on the reliability prediction of IGBT modules in modular multilevel converters[C] // 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), October 1-5, 2017, Cincinnati, OH, USA.
- [63] 王希平, 李志刚, 姚芳. 考虑任务剖面的模块化多电平换流器可靠性评估方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2495-2507.
WANG Xiping, LI Zhigang, YAO Fang. The reliability assessment method for MMCs considering mission profile[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2495-2507.

收稿日期: 2023-10-25; 修回日期: 2024-03-16

作者简介:

李康(1992—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力电子器件及高压直流输电系统可靠性分析; E-mail: kangli007@whu.edu.cn

黄萌(1984—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要研究方向为电力电子并网变流器安全运行和控制; E-mail: meng.huang@whu.edu.cn

查晓明(1967—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博导, 主要研究方向为大功率电力电子装置。E-mail: xmzha@whu.edu.cn

(编辑 许威)