

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.06.014

计及系统状态的多端柔性直流输电系统可靠性评估及灵敏度分析

马彦琴¹, 杨刚¹, 李湛宇¹, 郭莹¹, 雷博鸿²

(1. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 西安 710075;

2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 多端柔性直流输电技术正在迅速发展,而对其进行可靠性分析是保证直流输电系统安全稳定运行的前提。由于目前缺乏对多端直流输电系统可靠性的定性与定量评估以及提升方法的研究,本文提出了一种基于状态空间法和分步组合模型的多端柔性直流输电系统可靠性建模方法。该方法考虑到多端柔性直流输电工程的多种实际运行状态,分别建立了直流线路和换流站子系统的状态转移模型,通过求解供电可用率、年等效停运时间等可靠性指标验证了该方法的正确性与可行性。最后采用分层等值法建立了可靠性指标对元件故障率灵敏度的解析表达式,定量分析得到了系统可靠性最薄弱环节。研究可给实际柔直工程的可靠性评估提供一定的参考。

关键词: 多端柔性直流输电; 运行模式; 状态空间法; 可靠性; 灵敏度

Reliability Assessment and Sensitivity Analysis of Multi-terminal VSC-HVDC System Considering System Status

MA Yanqin¹, YANG Gang¹, LI Zhanyu¹, GUO Ying¹, LEI Bohong²

(1. Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group,

Xi'an 710075, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University,

Xi'an 710049, China)

Abstract: The multi-terminal VSC-HVDC transmission technology is developing rapidly and its reliability analysis is a prerequisite to ensure the safe and stable operation of the DC transmission system. Due to the lack of qualitative and quantitative assessment and study of improvement methods for the reliability of multi-terminal DC transmission systems at present, a kind of reliability modeling method for multi-terminal VSC-HVDC systems based on status spacial method and step-by-step combination model is proposed in this paper. The various practical operating status of multi-terminal VSC-HVDC transmission projects are considered in this method, the status transition models for DC line and subsystem of converter station are set up respectively. The correctness and feasibility of this method are verified by solving such reliability indicators as power supply availability and annual equivalent outage time. Finally, an analytical expression for the sensitivity of reliability index to component failure rates is set up by using the hierarchical equivalence method, and the weakest link of system reliability is quantitatively analyzed. The research can provide some reference for the reliability assessment of actual VSC-HVDC projects.

Keywords: multi-terminal VSC-HVDC transmission; operation mode; status-spacial method; reliability; sensitivity

0 引言

柔性直流输电技术(voltage source converter-based high voltage direct current, VSC-HVDC)是一种

在 20 世纪 90 年代兴起的基于电压源换流器的新型直流输电技术,具有可控性强、无换相失败问题、谐波含量小等优点^[1],广泛应用于可再生能源并网、城市供电、交流系统互联、孤立无源负荷供电、改善

收稿日期:2024-08-30

电能质量等场合^[2-7]。基于 VSC-HVDC 的多端直流输电(multi-terminal HVDC, MTDC)技术是构成直流电网的关键技术^[8-12]。直流电网的多网孔结构可以有效抑制新能源的功率波动,提高供电可靠性^[13-15]。如我国已建成的张北柔性直流电网示范工程是世界首个直流电网工程,解决了张家口地区的大规模新能源送出问题,并为京津冀地区提供了稳定、可靠的清洁能源^[16-17]。该工程的成功运行证明了直流电网将成为未来电网不可或缺的一部分。然而,多端直流电网中含有的大量电力电子设备使得难以对其进行可靠性评估,严重制约未来直流电网的发展^[18]。因此,有效的可靠性评估以及灵敏度分析对未来直流电网的安全稳定和经济运行具有重要意义。

目前针对柔性直流输电系统的可靠性分析方法主要有频率和持续时间法(FD法)、故障树法、状态空间法、状态解析法和蒙特卡洛模拟法等。许多学者开展了对柔性直流输电系统可靠性的研究,但是仅限于在常规两端柔性直流输电系统的可靠性分析方面^[19-24],对于多端柔性直流输电系统可靠性评估的研究比较匮乏。文献[25]根据状态空间法提出了一种适用于海上风电的多端直流输电系统可靠性评估的等效模型,同时引入灵敏度定性分析。文献[26]利用基于布尔代数方法的高效矩阵程序计算

高压直流输电系统的故障概率,可以以较为简单的矩阵形式描述考虑多个降额状态的复杂度很高的 MTDC 系统。文献[27]考虑系统在运行工况下的状态转移过程,基于半马尔可夫方法建立了五端 VSC-HVDC 可靠性评估模型。

然而这些方法对于 VSC-MTDC 在考虑不同工作模式下的可靠性评估仍有不足,针对薄弱环节进行量化分析研究也较少。基于此,本文考虑实际多端柔性直流输电工程的结构及运行方式,提出了结合状态空间法和系统等效结构的多端柔性直流输电系统可靠性评估方法,在保证求解可靠性指标计算量较小的同时有更高的求解精度。进一步对可靠性指标进行灵敏度分析,可以准确确定关键电气元件对系统可靠性水平的影响程度,为制定提高系统可靠性的改进措施提供坚实的理论基础。

1 多端柔性直流输电系统可靠性建模

1.1 柔性直流输电系统可靠性建模

对称双极柔性直流输电系统的结构示意图见图 1,其中主要的组成设备包括:交流断路器、换流变压器、接地电抗器、VSC 换流器、换流站的控制保护系统、冷却设备、平波电抗器、直流输电线路和极设备等。

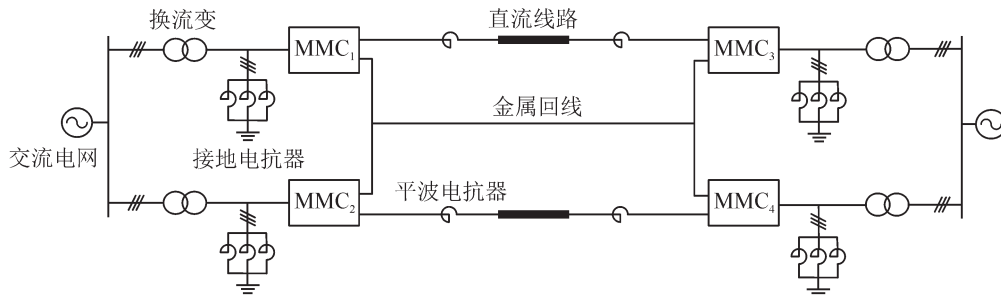


图1 对称双极柔性直流输电系统结构示意图

Fig. 1 Strustual schematic diagram of symmetrical bipolar VSC-HVDC system

由于柔性直流输电系统的元件众多且结构复杂,为了在保证可靠性精确度的前提下尽可能减少计算量,需要对其按照功能和连接关系进行子系统划分^[28],划分如下:

- 1)换流变压器子系统:换流变压器、交流断路器等;
- 2)换流器子系统:换流阀组、阀控、阀冷却设备、保护装置等;
- 3)控制保护子系统;
- 4)极设备子系统:中性点接地支路及相关开关元件;
- 5)直流线路子系统:直流输电线路、直流断路器、平波电抗器。

根据各个子系统的连接关系和运行方式,单侧单极换流站的运行状态只有正常运行和故障两种状态。其中 1)、2)、3)、4)子系统可以组成单个换流站,这 4 个子系统中任意一个子系统故障都会导致此换流站故障。基于马尔可夫状态转移得到换流站的状态空间图见图 2。

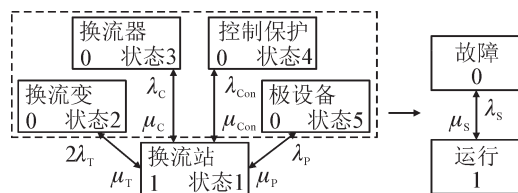


图2 换流站状态空间图

Fig. 2 Status spatial diagram of converter station

根据图2可以写出子系统的转移概率矩阵 $A^{[29]}$ 公式为

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & 2\lambda_1 & \lambda_C & \lambda_{Con} & \lambda_P \\ \mu_1 & a_{22} & 0 & 0 & 0 \\ \mu_C & 0 & a_{33} & 0 & 0 \\ \mu_{Con} & 0 & 0 & a_{44} & 0 \\ \mu_P & 0 & 0 & 0 & a_{55} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $a_{ii} = -\sum_{j=1, j \neq i}^5 a_{ij}$, 根据状态转移条件可列出线性方程组(2), 得到5个状态下的稳态概率。

$$\begin{cases} PA = 0 \\ \sum_{n=1}^5 p_n = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)经简单变换得到式(3), 求解方程组式(3)可以得出5个状态下的稳态概率。

$$\begin{cases} Q = g(A, I) \\ P = Q^{-1}B \end{cases} \quad (3)$$

式中: P 为状态概率矩阵; $I = [1 \ 1 \ \dots \ 1]$; 函数 g 表示将 A 转置后最后一行由 I 代替; $B = [0 \ 0 \ \dots \ 1]^T$ 。

由FD法得到转移频率矩阵 F 公式为

$$F = \text{diag}(P)A \quad (4)$$

图2等值前为5状态, 其中状态1为正常运行状态, 对应运输容量为100%, 状态2至状态5分别代表换流变、换流器、控制保护和极设备4个子系统故障状态, 对应运输容量为0%。等值后得到100%、0%的2状态模型, 建立 M 矩阵描述等值前后状态对应关系, 得到等值后的状态概率矩阵和转移概率矩阵, 公式为

$$P' = MP \quad (5)$$

$$F' = MFMT^T \quad (6)$$

$$A' = (M \text{diag}(P)M^T)^{-1} M \text{diag}(P)AM^T \quad (7)$$

式中, $M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ 。

换流站的等效故障率 λ_{eq} 和修复率 μ_{eq} 公式为

$$\lambda_{eq} = \frac{\sum_{i \in I} \left(p_i \sum_{j \in J} \lambda_{ij} \right)}{\sum_{i \in I} (p_i)} \quad (8)$$

$$\mu_{eq} = \frac{\sum_{j \in J} \left(p_j \sum_{i \in I} \mu_{ji} \right)}{\sum_{j \in J} (p_j)} \quad (9)$$

式中: I 为对应运输容量为100%的集合; J 为对应运输容量为0%的集合。

根据状态合并方程(8)–(9)得到换流站的等效故障率和修复率, 用于进一步计算系统的可靠性指标。

1.2 多端柔性直流输电系统结构

四端双极柔直系统拓扑结构图见图3。图3中由4条总长648 km的架空输电线路连接成互联电网, 4个换流站均使用模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)。其中换流站1、2为新能源汇入站, 接入220 kV交流电网, 容量均为1 500 MW; 换流站3为平衡站, 连接抽水蓄能电站; 换流站4为能量输出站, 接入500 kV交流电网, 容量为3 000 MW^[30]。系统正常运行时各个换流站输送的容量见表1。

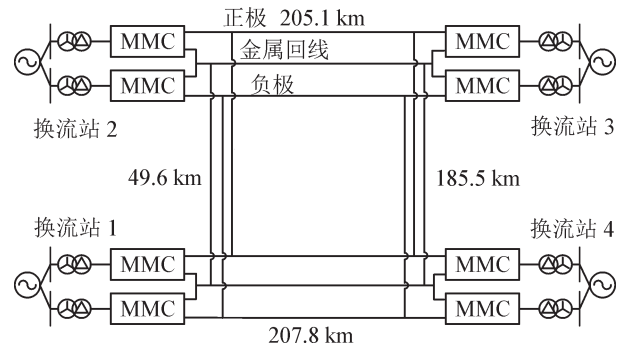


图3 四端双极柔直系统拓扑结构图

Fig. 3 Topological diagram of four-terminal bipolar VSC-HVDC system

表1 四端柔直系统各个换流站的输送容量

Table 1 Transmission capacity of each converter station of four-terminal VSC-HVDC system

名称	换流站1	换流站2	换流站3	换流站4/MW
容量/MW	1 500	1 500	0	-3 000

1.3 多端柔性直流输电系统可靠性模型

1.3.1 单回路运行状态可靠性建模

单极单回路运行状态下, 各个换流站和各条直流线路之间相互独立, 可将其作为建立可靠性模型的最小单元。考虑到环网结构的复杂性, 使用基本的串并联模型来等效这种结构通常不够精确。此外, 由于环网系统涉及多个组件, 直接绘制完整的状态空间图会导致图形过于庞大且难以处理。因此为了建立合理且结构尽可能简单的可靠性模型, 本文引入故障树法的概念来进行分析。通过分析各条线路的组合状态, 可以将系统分为3种等效结构。针对这3种结构分别建立相应的状态空间模型并计算可靠性指标, 最后按照容量值分类合并得到最终的可靠性指标结果。

对于单回路系统, 系统等效简化图见图4, 其中 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 分别代表换流站1、2、3、4。

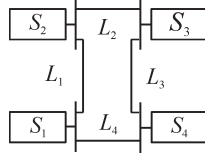


图4 直流线路等效简化图

Fig. 4 Equivalent simplified diagram of DC line

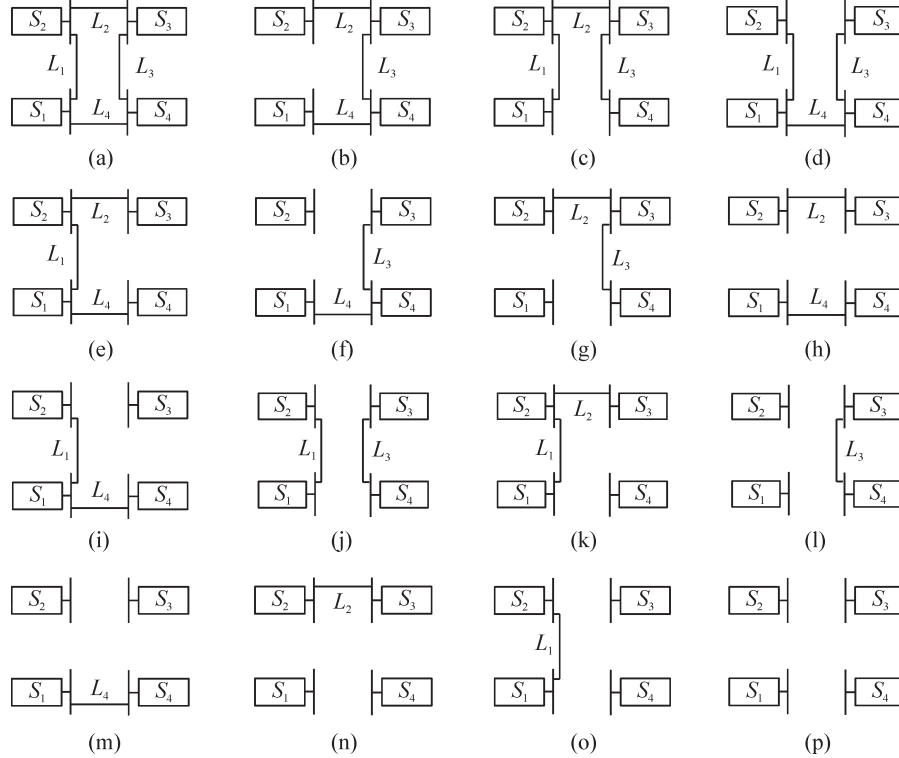


图5 直流线路运行状态图

Fig. 5 Operation status diagram of DC line

在不考虑换流站是否故障的前提下,得到4条直流线路16种运行状态之间的状态转移过程,根据受端站 S_4 连接到送端站的数量,将(a)-(e)和(i)

合并为连接2个送端站的 $Model_1$, (f)、(g)、(h)和(m)合并为连接1个送端站的 $Model_2$,其余状态合并为不连接送端站的 $Model_3$,如图6所示。

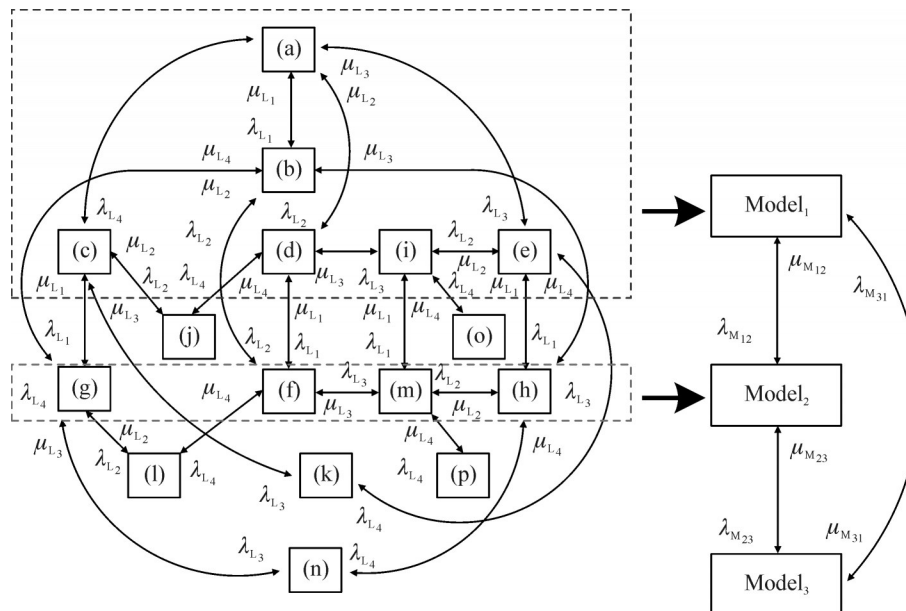


图6 直流线路状态转移过程

Fig. 6 Status transfer process of DC line

根据上述分析,作为受端仅有换流站 S_4 向外部输出电能,因此可以使用简化的结构等效模型进行可靠性建模,左边 X 、 Y 代表两个送端换流站,右边 Z 代表受端换流站,3种等效简化结构模型见图7,在 $Model_1$ 情况下受端换流站易出现功率冗余,需要平衡站 S_3 正常工作参与功率调节,系统处于3种等效结构下的概率分别为 P_{M1} 、 P_{M2} 、 P_{M3} 。

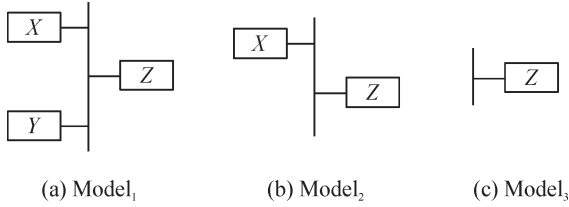


图7 3种等效简化结构

Fig. 7 Three kinds of equivalent simplified structures

假设换流站子系统 X 、 Y 、 Z 的等效故障率分别为 λ_X 、 λ_Y 、 λ_Z , 等效修复率分别为 μ_X 、 μ_Y 、 μ_Z , 对于直流线路3种等效简化结构模型下换流站的状态空间图见图8,并且采用状态合并的等效过程,将3种简化模型基于多端系统的容量值100%、50%和0%分别等效转换为三状态、两状态和一状态的状态空间模型。

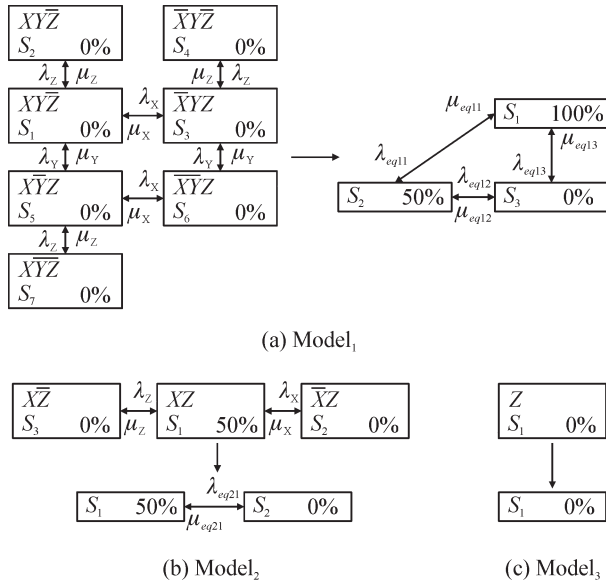


图8 换流站结构状态空间图

Fig. 8 Structural status spatial diagram of converter station

由上述状态合并方法可得到系统处于3种换流站等效结构模型下的概率以及3种模型下不同系统容量的概率 P_{M-i-j} , 其中 i 代表结构模型, j 代表该模型下的系统容量。最后可使用状态合并及FD法计算得到分别处于100%、50%和0%这3种容量

的可靠性结果。

1.3.2 双回路运行状态可靠性建模

双极多端柔性直流输电系统根据单极是否发生故障,可以在双极对称和双极不对称的情况下运行。当某一极的直流线路发生故障时,在设备容量允许的情况下,可以将故障极功率转移到非故障极传输。

鉴于系统设计容量比实际运行容量有一定的余量,本文做出以下假设:当一极的直流线路出现故障,另一极不会发生功率交叉。在一段时间内,单极可以转代全部传输功率,所以双回路运行情况下即使发生单极故障,换流站依然可以被等效为运行和失效的两状态模型。基于上述假设,双回路可以被视为两个单回路的并联连接,可以利用并联等效模型进行计算。

1.4 多端柔性直流输电系统灵敏度分析

为了找出系统薄弱环节,需要量化得到可靠性指标对元件参数的灵敏度。设系统某元件参数为 z , 则状态概率矩阵、状态空间转移率矩阵和转移频率矩阵灵敏度公式为

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\partial(Q^{-1}B)}{\partial z} = -Q^{-1} \frac{\partial Q}{\partial z} Q^{-1} B \quad (10)$$

$$\frac{\partial F}{\partial z} = \frac{\partial(\text{diag}(P)A)}{\partial z} = \text{diag}\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)A + \text{diag}(P) \frac{\partial A}{\partial z} \quad (11)$$

结合式(5)、式(7)可得到单次等值后状态概率矩阵和转移概率矩阵对元件参数 z 的灵敏度。

$$\frac{\partial P'}{\partial z} = \frac{\partial(MP)}{\partial z} = M \frac{\partial P}{\partial z} = M \left(-Q^{-1} \frac{\partial Q}{\partial z} Q^{-1} B \right) \quad (12)$$

$$\frac{\partial A'}{\partial z} = \frac{\partial(\text{diag}^{-1}(MP)MFM^T)}{\partial z} = \text{diag}^{-1}(MP)M \frac{\partial F}{\partial z} M^T - \text{diag}^{-1}(MP) \text{diag}\left(M \frac{\partial P}{\partial z}\right) \text{diag}^{-1}(MP)MFM^T \quad (13)$$

根据1.3.1节可靠性建模方法得出此多端柔直系统的可靠性指标EA及年等效停运小时数EOH的计算公式为

$$EA = 100 \times \left[P_{M1} \times P_{M1-100} + \frac{1}{2} (P_{M1} \times P_{M1-50} + P_{M2} \times P_{M2-50}) \right] \quad (14)$$

$$EOH = 8760 \times \left(1 - \frac{EA}{100} \right) \quad (15)$$

由于直流线路和换流站的故障率会分别影响不同步骤的状态概率,因此需要分两种情况分析上述可靠性指标对 z 的灵敏度。改变直流线路故障率

只影响 P_{M1} 、 P_{M2} , 此时 P_{M1-100} 、 P_{M1-50} 和 P_{M1-0} 为定值; 改变换流站内元件故障率只影响 P_{M1-100} 、 P_{M1-50} 和 P_{M1-0} , 此时 P_{M1} 、 P_{M2} 为定值。因此经过多次等值得到可靠性指标对直流线路转移率的灵敏度计算公式为(16)–(17), 对换流站内元件转移率的灵敏度计算公式为(17)–(18)。

$$\frac{\partial EA}{\partial z} = 100 \times \left(P_{M1-100} \times \frac{\partial P_{M1}}{\partial z} + \frac{1}{2} \left(P_{M1-50} \times \frac{\partial P_{M1}}{\partial z} + P_{M2-50} \times \frac{\partial P_{M2}}{\partial z} \right) \right) \quad (16)$$

$$\frac{\partial EOH}{\partial z} = 8760 \times \left(-\frac{\partial EA}{\partial z} / 100 \right) \quad (17)$$

$$\frac{\partial EA}{\partial z} = 100 \times \left(P_{M1} \times \frac{\partial P_{M1-100}}{\partial z} + \frac{1}{2} \left(P_{M1} \times \frac{\partial P_{M1-50}}{\partial z} + P_{M2} \times \frac{\partial P_{M2-50}}{\partial z} \right) \right) \quad (18)$$

一般不同元件的可靠性参数取值不同, 为了便于比较可靠性指标对不同元件的灵敏度, 引入归一化灵敏度, 来更精准地辨识系统的薄弱环节。归一化灵敏度是系统可靠性指标相对变化量与元件可靠性参数相对变化量之比, 定义为

$$\frac{\partial R'}{\partial z} = \frac{\partial R}{\partial z} \times \frac{z}{R} \quad (19)$$

式中, R 代表系统可靠性指标。

若系统可靠性指标对某一元件参数的灵敏度结果绝对值最大, 则说明该元件对系统的可靠性影响最大, 对此元件进行改善可最大程度地提高系统可靠性水平。

2 算例分析

柔性直流输电系统中主要组合元件的可靠性原始数据见表 2^[31], 依据表 2 计算系统可靠性参数。

表 2 柔直系统可靠性原始数据
Table 2 Reliability original data of VSC-HVDC system

子系统	故障率/ (次/年)	修复率/ (次/年)	安装率/ (次/年)
换流阀	0.031	486.667	11 680
控制保护	1.309	1 095.000	10 950
换流变压器	0.007	350.400	7 300
极设备	0.050	758.442	4 380
直流线路	0.661	988.713	5 840

2.1 可靠性指标计算分析

按照状态合并方法得到各个子系统两状态的等效故障率及等效修复率, 见表 3。

表 3 柔直系统等效两状态可靠性数据
Table 3 Reliability data of equivalent dual status of VSC-HVDC system

子系统	等效故障率/ (次/年)	等效修复率/ (次/年)
换流阀	0.031	467.200
控制保护	1.309	995.455
换流变压器	0.007	334.351
极设备	0.050	646.495
换流站	1.397	944.474
直流线路	0.661	852.863

假设所有端口的子系统可靠性数据一致, 基于不同子系统的等效故障率与等效修复率, 分别计算系统在单回路和双回路运行时的可靠性指标, 见表 4–5。

表 4 柔直系统单回路运行可靠性指标
Table 4 Operation reliability index of single circuit of VSC-HVDC System

指标	100% 容量	50% 容量	0 容量
频率/(次/年)	4.167 454	2.796 817	1.399 452
平均持续时间	0.238 538 24	0.001 580 00	0.001 062 00
概率	0.994 097	0.004 419	0.001 487
年等效停运 小时数/(h/年)	—	32.356 752	—
供电可用率	—	0.996 306	—
年等效停电电量/ (MW·h/年)	—	48 535.128 488	—

表 5 柔直系统双回路运行可靠性指标
Table 5 Operation reliability index of dual circuit of VSC-HVDC System

指标	100% 容量	50% 容量	0 容量
频率/(次/年)	0.012 764	0.012 761	5.93×10^{-8}
平均持续时间	78.346 912	0.007 281	0.036 404
概率	0.999 990 7	9.293×10^{-6}	2.159×10^{-10}
年等效停运 小时数/(h/年)	—	0.040 704	—
供电可用率	—	0.999 994 5	—
年等效停电电量/ (MW·h/年)	—	122.111 928	—

计算结果显示, 单回路运行的年等效停运小时数为 32.356 752 h, 双回路运行的年等效停运小时数为 0.040 704 h, 单回路约为双回路年停电时间的 794 倍。单回路的供电可用率为 99.630 6%, 而双回路的供电可用率可达到 99.999 45%, 供电可用率得到了明显提升。双回路可靠性高于单回路可靠性符合实际情况, 证明了前文分析计算的正确性。

同一场景下本文所提的考虑运行模式的 VSC-MTDC 系统可靠性评估方法计算结果与文献[32]可靠性计算结果的对比见表 6。

表6 可靠性计算结果比较
Table 6 Comparison of reliability calculation result

指标	本文结果		参考文献 ^[32] 结果	
	单回路	双回路	单回路	双回路
系统年等效停运小时数/(h/年)	32.356 752	0.040 704	33.051 500	0.053 027
供电可用率/%	99.630 6	99.999 5	99.622 7	99.999 4
年等效停电电量/(MW·h/年)	48 535.128	122.112	49 577.220	159.081

从表6可知分别在单回路与双回路运行条件下,本文计算得到的系统年等效停运小时、供电可用率与参考文献计算得到的数值相对误差分别小于2.4%、0.008%,在误差允许范围之内,证明了本文所提可靠性计算方法的可行性与有效性。由于本文进一步考虑了平衡站3这一调节站在提升系统可靠性方面发挥的作用,并且相较于文献[32]仅考虑三段直流线路的等效方法,本文考虑的四段环形直流线路更符合具体的运行状态,无论是单回路运行条件还是双回路运行条件,本文计算得到的供电可用率均大于文献[32]计算得到的供电可用率,系统年等效停运小时与年等效停电电量均小于文献[32]对应的计算结果。因此,本文的计算结果更加接近实际运行场景。

2.2 灵敏度分析

按1.4节所述方法分析计算EA和EOH时对主要元件(换流器、控制保护、换流变压器、极设备、直流线路)故障率的灵敏度,并按照灵敏度大小进行降序排列,计算结果见表7。归一化灵敏度结果见表8。

表7 可靠性指标对元件故障率灵敏度
Table 7 Sensitivity of reliability index to component's failure rate

子系统	EA	EOH
换流变压器	-0.596	52.209 6
换流阀	-0.426	37.317 6
极设备	-0.308	26.980 8
控制保护	-0.200	17.522 0
直流线路	-6.322×10 ⁻⁴	0.055 4

表8 可靠性指标对元件故障率归一化灵敏度
Table 8 Normalized sensitivity of reliability index to component's failure rate

子系统	EA	EOH
控制保护	-0.262 7	0.886 5
极设备	-0.015 4	0.052 1
换流阀	-0.013 4	0.045 1
换流变压器	-0.003 9	0.013 3
直流线路	-4.193 9×10 ⁻⁴	0.001 4

观察上述两表可知,灵敏度的排列顺序归一化前后并不一致。表7中EA、EOH对元件参数灵敏度由高到低排列顺序为换流变压器、换流阀、极设备、控制保护、直流线路,而表8灵敏度归一化后由高到低排列顺序为控制保护、极设备、换流阀、换流变压器、直流线路。这是不同元件的可靠性参数取值差异导致的,灵敏度归一化后的结果可以消除该影响。分析故障率变化对EA、EOH的影响见图9,图中EA、EOH随元件故障率增大的变化率由高到低为控制保护、极设备、换流器、换流变、直流线路,与灵敏度归一化后的结果相符,即证实了按照归一化灵敏度对系统可靠性进行灵敏度分析的正确性和合理性。

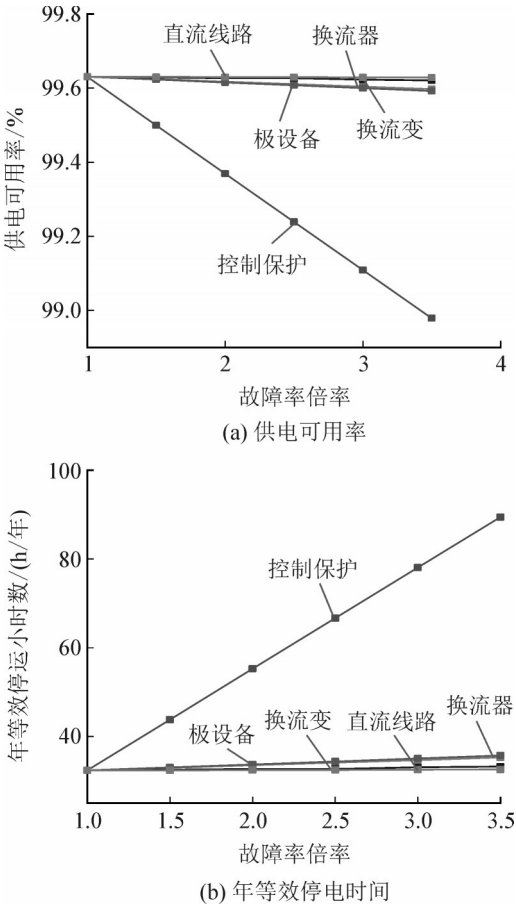


图9 可靠性灵敏度随故障率变化曲线
Fig. 9 Variation curve of reliability and sensitivity with failure rate

分析表8和图9可以得出控制保护子系统的故障率变化对EA、EOH等可靠性指标影响最大,而极设备、换流器、换流变与直流线路的故障率对可靠性指标的影响相近,且均远小于控制保护子系统故障率变化产生的影响。因此改变控制保护子系统的故障率对提升柔直系统的可靠性最为有效,实际应用中也可以考虑配置1套备用控制保护设备,

也可以有效降低控制保护子系统的等效故障率。

EA、EOH对直流线路故障率的灵敏度最小,并且在1.3.1节中系统等效简化结构处于Model₁状态的稳态概率计算结果为99.999 07%,当直流线路故障率升高1倍时变为99.996 29%,变化率仅为0.002 8%。而系统处于Model₁状态表明此时直流线路的故障情况并未影响系统正常传输能量,只要与合理快速的控制策略配合得当,系统运行状态基本不会受到影响。

3 结语

本文以四端柔性直流输电系统为例建立了对应的柔性直流输电系统可靠性评估模型,使用该模型计算可靠性指标并进行灵敏度分析,得到如下结论:

1)建立的四端柔直系统可靠性评估模型将整个系统拆分为5个子系统,降低了系统复杂度以及计算难度;分别对换流站与直流线路的运行状态建模,结合故障树法简化直流线路的复杂运行状态,最后采用分步组合的计算方法,在高效计算的同时可以精准评估四端柔直系统的可靠性水平;

2)研究了不同子系统的故障率对可靠性计算结果的影响,通过量化可靠性指标对子系统参数的灵敏度,同时引入归一化灵敏度消除不同子系统参数不同产生的差异,判断得出对系统可靠性影响最大的子系统,继而对相应参数进行改善以最大程度提高系统的可靠性水平;

3)基于本文提出的可靠性评估方法求得的四端柔直系统单回路运行的稳态概率约为99.630 6%,双回路运行的稳态概率约为99.999 5%;灵敏度分析显示系统中最薄弱的部分为控制保护子系统,在实际应用中改进控制保护子系统可显著提高系统的可靠性,而极设备、换流器、换流变与直流线路对系统运行影响较小。可靠性评估结果可给实际多端柔直工程提供一定的参考依据。

参考文献

- [1] 李兴源,曾琦,王渝红,等. 柔性直流输电系统控制研究综述[J]. 高电压技术,2016,42(10):3025-3037.
LI Xingyuan, ZENG Qi, WANG Yuhong, et al. Control strategies of voltage source converter based direct current transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3025-3037.
- [2] 饶成诚,王海云,王维庆,等. 基于储能装置的柔性直流输电技术提高大规模风电系统稳定运行能力的研究[J]. 电力系统保护与控制,2014(4):1-7.
RAO Chengcheng, WANG Haiyun, WANG Weiqing, et al. Enhancement of the stable operation ability of large-scale wind power system based on the VSC-HVDC embedded in energy storage apparatus[J]. Power System Protection and Control, 2014(4): 1-7.
- [3] 汤广福,罗湘,魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [4] 王志新,吴杰,徐烈,等. 大型海上风电场并网VSC-HVDC变流器关键技术[J]. 中国电机工程学报,2013(19):14-26.
WANG Zhixin, WU Jie, XU Lie, et al. Key technologies of large offshore wind farm VSC-HVDC converters for grid integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2013(19): 14-26.
- [5] 郭敬梅,杜胜磊,王红星,等. 含多场控集成的海上风电场DIGSILENT/PowerFactory建模及实证技术研究[J]. 广东电力,2023,36(10):66-76.
GUO Jingmei, DU Shenglei, WANG Hongxing, et al. DIGSILENT/PowerFactory modeling and model verification research of offshore wind farm integrated with multiple station control functions[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(10): 66-76.
- [6] 王中权,刘维斌,孙泉雄,等. 限功率工况风电场一次调频与疲劳抑制协调优化控制研究[J]. 电网与清洁能源,2023,39(2):114-121.
WANG Zhongquan, LIU Weibin, SUN Xiaoxiong, et al. A study on coordinated optimal control for primary frequency regulation and fatigue suppression of wind farms under limited power condition[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(2): 114-121.
- [7] 饶宏,黄伟煌,郭知非,等. 柔性直流输电技术在大电网中的应用与实践[J]. 高电压技术,2022,48(9):3347-3355.
RAO Hong, HUANG Weihuang, GUO Zhifei, et al. Application and practice of flexible DC transmission technology in large power grids[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3347-3355.
- [8] 张晓林,张帆,李甲飞,等. 考虑桥臂参数不对称和子模块故障的MMC协同控制策略[J]. 电网与清洁能源,2023,39(5):76-84.
ZHANG Xiaolin, ZHANG Fan, LI Jiafei, et al. MMC cooperative control strategy considering asymmetry of arm parameters and sub-module faults[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(5): 76-84.
- [9] 黄怡,王祺,向晖,等. 基于桥臂虚拟电压的MMC-MG相间功率平衡控制策略[J]. 电网与清洁能源,2022,38(1):46-56.
HUANG Yi, WANG Qi, XIANG Hui, et al. Inter-phase

- power balance control strategy of MMC-MG based on bridge arm virtual voltage[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(1): 46-56.
- [10] 李翠萍, 余芳芳, 李军徽, 等. 基于MMC的多端高压直流输电系统研究综述[J]. 现代电力, 2017, 34(1): 62-68.
LI Cuiping, YU Fangfang, LI Junhui, et al. Review of multi-terminal HVDC transmission system based on modular multilevel converter[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(1): 62-68.
- [11] 苏寅生, 赵利刚, 姚海成, 等. 100% 新能源电源经柔性直流送出系统的机电暂态建模仿真研究[J]. 广东电力, 2023, 36(10): 57-65.
SU Yinsheng, ZHAO Ligang, YAO Haicheng, et al. Research on electromechanical transient modeling and simulation of 100% new energy power source connected by MMC-HVDC[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(10): 57-65.
- [12] 禹晋云, 陈鹤, 辛业春, 等. LCC-MMC混合型直流融冰装置拓扑结构及控制方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(2): 1-9.
YU Jinyun, CHEN He, XIN Yechun, et al. A study on topology and control method of the LCC-MMC hybrid DC ice-melting device[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(2): 1-9.
- [13] 刘泽洪, 郭贤珊. 含新能源接入的双极柔性直流电网运行特性研究与工程实践[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3595-3603.
LIU Zehong, GUO Xianshan. Operation characteristics and engineering practice of bipolar flexible DC grids with renewable energy integration[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3595-3603.
- [14] 郭贤珊, 周杨, 梅念, 等. 张北柔直电网的构建与特性分析[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3698-3707.
GUO Xianshan, ZHOU Yang, MEI Nian, et al. Construction and characteristic analysis of Zhangbei flexible DC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3698-3707.
- [15] 温家良, 吴锐, 彭畅, 等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 7-12.
WEN Jialiang, WU Rui, PENG Chang, et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 7-12.
- [16] 郭铭群, 梅念, 李探, 等. ± 500 kV 张北柔性直流电网工程系统设计[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 4194-4204.
GUO Mingqun, MEI Nian, LI Tan, et al. System design of ± 500 kV Zhangbei VSC-based DC grid project[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 4194-4204.
- [17] 李英彪, 卜广全, 王姗姗, 等. 张北柔直电网工程直流线路短路过程中直流过电压分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3391-3399.
LI Yingbiao, BU Guangquan, WANG Shanshan, et al. Analysis of DC overvoltage during DC line short-circuit process in Zhangbei flexible DC grid project[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3391-3399.
- [18] 宋汶秦, 朱旭, 赵春娟, 等. 基于UKF的柔性直流输电系统故障电流抑制方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(4): 9-16.
SONG Wenqin, ZHU Xu, ZHAO Chunjuan, et al. Fault current suppression in HVDC flexible transmission system based on UKF[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(4): 9-16.
- [19] 谢开贵, 胡博. 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.
- [20] 丁明, 毕锐, 王京景. 基于FD法和模型组合的柔性直流输电可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2008(21): 33-37.
DING Ming, BI Rui, WANG Jingjing. FD method and combined model for reliability assessment of HVDC flexible[J]. Power System Protection and Control, 2008(21): 33-37.
- [21] 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(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(23): 8-13.
- [22] 马河涛, 黄守道, 饶宏, 等. 基于马尔可夫过程的柔性直流输电系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 10-16.
MA Hetao, HUANG Shoudao, RAO Hong, et al. Reliability analysis of VSC-HVDC system based on Markov process[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 10-16.
- [23] 王晟, 冯春媚, 文安, 等. 海上风电直流传输网络的成本效益分析(英文)[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 36-43.
WANG Sheng, FENG Chunmei, WEN An, et al. Cost and benefit analysis of VSC-HVDC schemes for offshore wind power transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 36-43.
- [24] 雷傲宇, 汪林光, 梅勇, 等. 多端柔性直流电网的中高频振荡特性分析[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(7): 55-60.
LEI Aoyu, WANG Linguang, MEI Yong, et al. An analysis of medium & high-frequency oscillation characteristics in multi-terminal flexible HVDC networks[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(7): 55-60.
- [25] 戴红阳, 李亚楼, 郝建红. 多端直流输电系统可靠性评估方法研究[J]. 现代电力, 2013, 30(6): 6-10.
DAI Hongyang, LI Yalou, HAO Jianhong. Study on reliability evaluation method for VSC-HVDC transmission system[J].

- Modern Electric Power, 2013, 30(6): 6-10.
- [26] J. S. CONTRERAS-JIMENEZ, F. RIVAS-DÁVALOS, J. SONG, et al. Multi-state system reliability analysis of HVDC transmission systems using matrix-based system reliability method[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 100: 265-278.
- [27] K. LI, M. HUANG, X. ZHA. Reliability analysis of multi-terminal VSC-HVDC based on semi-markov process[C]//2023 IEEE 2nd International Power Electronics and Application Symposium (PEAS), Guangzhou, IEEE, 2023: 1972-1975.
- [28] R. LEELARUJI, J. SETREUS, G. OLGUIN, et al. Availability assessment of the HVDC converter transformer system [C]//Proceedings of the 10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Rincon, IEEE, 2008: 1-8.
- [29] 郭永基. 可靠性工程原理[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.
- [30] 赵翠宇, 齐磊, 陈宁, 等. ± 500 kV 张北柔性直流电网单极接地故障健全极母线过电压产生机理[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 530-536.
- ZHAO Cuiyu, QI Lei, CHEN Ning, et al. Research on producing mechanism of healthy pole bus overvoltage for monopolar grounding fault in ± 500 kV Zhangbei flexible DC power grid[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 530-536.
- [31] 程林, 汪莹, 宋福龙, 等. 柔性交直流混联电网系统级可靠性评估[J]. 电力建设, 2017, 38(3): 55-62.
- CHENG Lin, WANG Ying, SONG Fulong, et al. Reliability evaluation of flexible AC/DC hybrid power grid[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(3): 55-62.
- [32] Z. ZHENG, Y. WANG, D. ZHANG, et al. Reliability evaluation model of Zhangbei multi-terminal HVDC transmission system[C]//2019 IEEE International Conference on Energy Internet, Nanjing, IEEE, 2019: 279-284.
- 作者简介:**
- 马彦琴(1980—), 女, 高级工程师, 研究方向为电网变电站控制保护。
- 杨刚(1983—), 男, 工程师, 研究方向为电网变电站控制保护。
- 李湛宇(1991—), 男, 工程师, 研究方向为电网变电二次保护。
- 郭莹(1993—), 女, 工程师, 研究方向为电网变电二次保护。
- 雷博鸿(2001—), 女, 硕士在读, 研究方向为柔性直流输电系统控制保护与可靠性。E-mail: lbh466773020@163.com。

(上接第97页)

- Reactive Power Compensation, 2024, 45(2): 126-133.
- [18] 张蕴昕, 孙运全. 混合储能风光互补微网中的控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 93-98.
- ZHANG Yunxin, SUN Yunquan. Control strategy of a hybrid energy storage in wind-solar hybrid generation microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 93-98.
- [19] 王民华, 李凤霞. 混合储能平抑微电网功率波动控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4): 215-220.
- WANG Minhua, LI Fengxia. Study on control strategy of hybrid energy storage used in stabilization power fluctuation of microgrid[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 215-220.
- [20] 郭潇潇, 李岚, 吴雷, 等. 基于下垂控制的微电网混合储能系统调频策略[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(2): 176-182.
- GUO Xiaoxiao, LI Lan, WU Lei, et al. Frequency modulation strategy of hybrid energy storage system of microgrid based on droop control[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(2): 176-182.
- [21] 王陈园, 傅春明, 张文赋, 等. 基于多电池组SOC一致性的光储联合电站平抑策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(6): 237-244.
- WANG Chenyuan, FU Chunming, ZHANG Wenfu, et al. Study on stabilization strategy of photovoltaic-storage combined power station based on SOC consistency of multi-battery pack[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(6): 237-244.
- 作者简介:**
- 程婷婷(1986—), 女, 工程师, 从事新能源技术工作。E-mail: 371336003@qq.com。
- 王智高(1987—), 男, 工程师, 从事新能源检测工作。
- 范伟强(1986—), 男, 高级工程师, 从事新能源检测工作。