

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250780

# 考虑输电线路直流改造的交直流混联系统可靠性评估

刘晓明<sup>1</sup>, 沈伊南<sup>1</sup>, 陈海<sup>1</sup>, 陈育龙<sup>1</sup>, 闻福岳<sup>2</sup>

(1. 智能配用电装备与系统全国重点实验室, 河北工业大学电气工程学院, 天津 300401;

2. 中电普瑞电力工程有限公司, 北京 102200)

**摘要:** 交流线路直流改造(交改直)能够在不增设输电走廊的情况下增大输电线路容量,但改造后直流输电系统(high voltage direct current, HVDC)对整个系统的可靠性影响难以量化。为此,提出一种考虑交改直的交直流混联系统可靠性评估方法。首先,分析常规双极直流输电(bi-pole HVDC, BP-HVDC)、备用式双极直流输电(redundant bi-pole HVDC, RBP-HVDC)和三极直流输电(tri-pole HVDC, TP-HVDC)子系统运行状态与传输容量的对应关系。其次,基于参数矩阵化频率与持续时间(frequency and duration, FD)法建立 HVDC 可靠性模型。最后,以 IEEE-RTS79 系统为算例,采用序贯蒙特卡洛法抽样交流元件和 HVDC 状态,结合最优切负荷模型,求得系统可靠性指标,进而评估交改直对交直流混联系统可靠性的影响。研究表明:交改直对系统可靠性的影响与原线路传输容量极限有关,对接近传输容量极限的线路直流改造能够提升系统可靠性和新能源消纳能力。

**关键词:** 交改直; 三极直流输电; 可靠性评估; 序贯蒙特卡洛法; 交直流混联

## Reliability assessment of hybrid AC/DC systems with AC-to-DC line conversion

LIU Xiaoming<sup>1</sup>, SHEN Yinan<sup>1</sup>, CHEN Hai<sup>1</sup>, CHEN Yulong<sup>1</sup>, WEN Fuyue<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Intelligent Power Distribution Equipment and System, School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. China EPRI Electric Power Engineering Co., Ltd., Beijing 102200, China)

**Abstract:** Converting existing AC transmission lines to DC operation (AC-to-DC line conversion) can increase transmission capacity without constructing additional transmission corridors. However, after conversion, the impact of HVDC systems on overall system reliability is difficult to quantify. Therefore, a hybrid AC/DC system reliability assessment method incorporating AC-to-DC line conversion is proposed. First, conventional bi-pole HVDC (BP-HVDC), redundant bi-pole HVDC (RBP-HVDC), and tri-pole HVDC (TP-HVDC) configurations are analyzed to establish correspondence between subsystem operating states and transmission capacities. Second, a HVDC reliability model is established based on the parameter-matrixed frequency and duration (FD) method. Finally, using the IEEE-RTS79 system as the test case, sequential Monte Carlo simulation is used to sample the states of AC components and HVDC systems. Combined with an optimal load shedding model, system reliability indices are obtained to evaluate the impact of AC-to-DC line conversion on the reliability of hybrid AC/DC systems. The results indicate that the impact of AC-to-DC line conversion on system reliability depends on the original transmission capacity limit of the lines; converting lines that operate close to their capacity limits can improve system reliability and enhance new energy accommodation capability.

This work is supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 52577155).

**Key words:** AC-to-DC line conversion; tri-pole DC transmission; reliability assessment; sequential Monte Carlo method; hybrid AC/DC system

## 0 引言

随着风电、光伏等新能源装机规模与负荷需求

的日益增长,电力供需的时空错配与跨区域输电瓶颈日益凸显<sup>[1]</sup>。一方面,新能源消纳需求激增与输电走廊资源稀缺形成冲突<sup>[2]</sup>,另一方面,交流输电受制于固有缺陷,如无功损耗高、线路利用率低、潮流控制被动,难以适应波动性新能源的大规模外

基金项目:国家自然科学基金面上项目资助(52577155)

送<sup>[3]</sup>。在此背景下，交改直作为输电线路扩容方案应运而生，该技术在可扩展输电走廊的情况下增大输电线路容量，提升新能源外送能力<sup>[4]</sup>。

交流线路改造后的直流输电系统(high voltage direct current, HVDC)根据线路使用情况可以分为双极结构和三极结构。文献[5]对比了多种双极结构和三极直流输电(tri-pole HVDC, TP-HVDC)增容能力，结果表明 TP-HVDC 增容能力最强。文献[6]对 TP-HVDC 工作机制进行分析，比较了常规双极直流输电(bi-pole HVDC, BP-HVDC)和 TP-HVDC 输电容量、冗余度、过载能力和经济性。文献[7]评估了交改直方案的经济性，研究表明在输电走廊约束下，交改直方案提升容量为 50%~150%时的盈亏平衡距离为 350 km。

现有研究主要聚焦于交改直拓扑结构、工作原理、输电容量和经济性，但鲜有研究聚焦于交改直可靠性评估。一方面，交改直后的 HVDC 元件多、结构复杂，使得其可靠性低于交流线路<sup>[8]</sup>，另一方面，直流输电系统传输容量高于交流输电线路<sup>[9]</sup>。综上分析，有必要研究交改直对系统可靠性的影响。

目前，国内外学者针对 HVDC 可靠性评估方法已有相关研究。文献[10]分析了 HVDC 运行模式，根据各子系统之间可靠性逻辑绘制了可靠性框图，提出了基于状态枚举法的 HVDC 可靠性评估方法。文献[11]考虑元件参数不确定性，将仿射算法与状态枚举法相结合，得到区间形式的可靠性指标。文献[12]采用蒙特卡洛法抽样 HVDC 元件状态，根据可靠性框图计算每种状态下 HVDC 传输容量、概率、频率、平均持续时间等指标，该方法计算量不受系统规模限制。文献[13]采用频率与持续时间(frequency and duration, FD)法建立 HVDC 可靠性模型，绘制状态空间图并进行计算分析。文献[14]提出改进 FD 法，将直流输电系统划分为多个子系统，将子系统核心参数进行矩阵化，简化计算过程，易于编程实现。

针对交直流混联系统可靠性评估方法的研究可分为两类。一类是考虑 HVDC 运行特性及交直流系统的相互影响，统一求取系统切负荷情况。如文献[15]考虑交、直流系统相互作用，采用二阶锥最优切负荷模型，计算系统可靠性指标。此类方法能够刻画交直流系统间相互作用，但计算速度较慢。另一类为先求取 HVDC 可靠性模型，再将其嵌入交流系统中，利用交流发输电系统可靠性评估方法进行求解。如文献[16]采用容量卷积法建立 HVDC 可靠性模型，将其嵌入交流系统中进行可靠性评估，提出了计及 HVDC 线路影响的有功调整模型。这类方法采用交流发输电系统可靠性评估方法，效率较高，

适用于大规模交直流混联系统评估。

交改直方案在不扩展输电走廊的情况下增大输电线路容量，提升新能源外送能力，且在长距离输电中更具经济性，但其对电力系统可靠性影响尚未进行充分研究。为此，提出一种考虑交改直的交直流混联系统可靠性评估方法，实施过程如下。

1) 建立交改直结构可靠性模型，计算交改直 HVDC 可靠性指标。一是分析内部子系统运行状态和传输容量对应关系与可靠性；二是采用参数矩阵化 FD 法建立可靠性模型，计算 HVDC 可靠性指标。

2) 量化交改直对交直流混联系统可靠性的影响。一是采用序贯蒙特卡洛法抽样系统中交流元件和 HVDC 状态；二是基于最优切负荷模型分析各系统状态；三是以 IEEE-RTS79 系统为算例，研究交改直对交直流混联系统可靠性影响。

技术路线如图 1 所示。

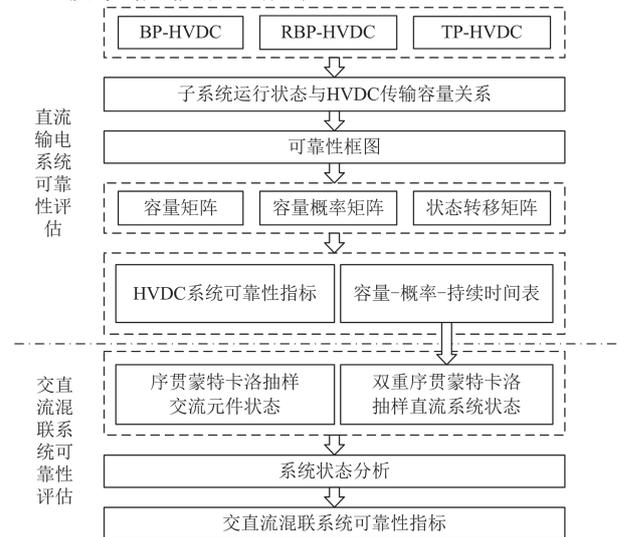


图 1 技术路线

Fig. 1 Technical roadmap

## 1 HVDC 运行方式及可靠性框图

### 1.1 BP-HVDC 运行方式及可靠性框图

BP-HVDC 通常采用双极双桥 12 脉波接线，每极包含 2 组 12 脉波换流阀。图 2 为双 12 脉波串联接线 HVDC 系统示意图。BP-HVDC 通常被划分为 5 个子系统(换流桥、换流变压器、交流滤波器组、直流场和直流输电线路子系统)<sup>[17]</sup>。

由于双 12 脉波接线直流输电系统每极有 2 组 12 脉波换流阀，当任一阀组发生故障时，可通过阀组旁路开关将其旁路，非故障阀组继续工作，系统只停运 25%容量。当单极直流线路或直流场设备故障时，系统仍能输送 50%功率，当双极直流线路或直流场设备故障时，系统将不再传输功率。系统容

量状态与元件运行状态关系分别如表 1 和表 2 所示。

路同时故障时, 直流输电系统将不再输送功率。

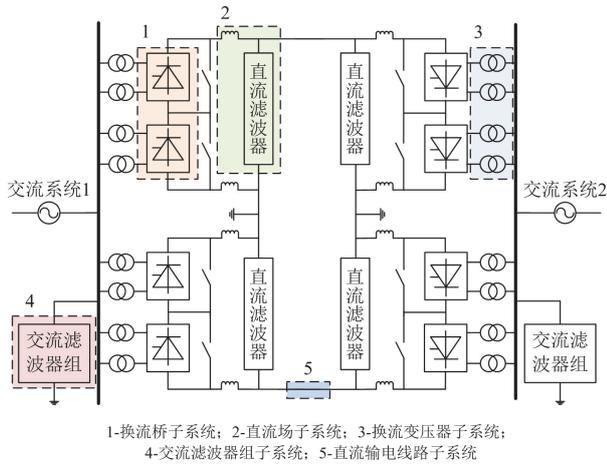


图 2 BP-HVDC 接线图

Fig. 2 Wiring diagram of BP-HVDC

表 1 BP-HVDC 容量与换流阀组/换流变压器运行状态关系

Table 1 Relationship between capacity of BP-HVDC and operating states of converter valve groups/converter transformers

运行状态	系统容量状态/%
正常运行	100
一极部分停运, 一极正常	75
一极停运, 一极正常	50
两极均部分停运	50
一极停运, 一极部分停运	25
双极停运	0

表 2 BP-HVDC 容量与直流线路/直流场运行状态关系

Table 2 Relationship between capacity of BP-HVDC and operating states of DC transmission lines/DC devices

运行状态	系统容量状态/%
正常运行	100
一极停运, 一极正常	50
双极停运	0

基于上述分析绘制 BP-HVDC 可靠性框图, 如图 3 所示。其中, ACF 为交流滤波器组子系统, V 为换流桥子系统, T 为换流变压器子系统, DCD 为直流场子系统, DCL 为直流线路子系统。

### 1.2 RBP-HVDC 运行方式及可靠性框图

图 4 为备用式双极直流输电(redundant bi-pole HVDC, RBP-HVDC)结构示意图(每个换流桥都是双 12 脉波串联换流桥)。RBP-HVDC 采用每极一相线制, 第三相线处于自由未连接状态, 在单极直流输电线路故障情况下, 第三相线可作为回路导线。当单极直流输电线路发生故障时, 可通过旁路开关投入第三根导线, 直流输电系统输送容量仍为 100%。当双极线

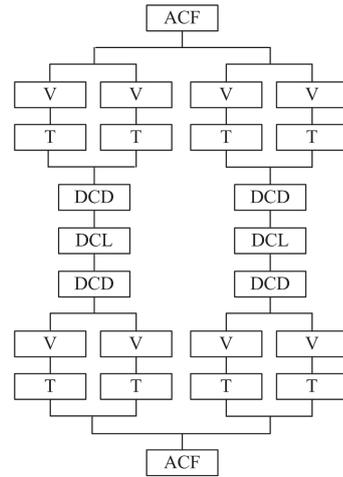


图 3 BP-HVDC 可靠性框图

Fig. 3 Reliability diagram of BP-HVDC

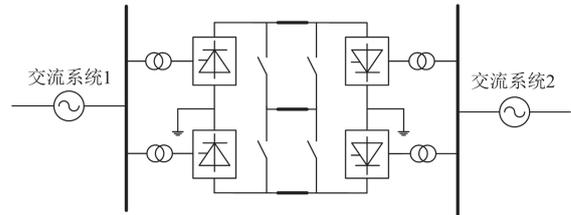


图 4 RBP-HVDC 示意图

Fig. 4 Schematic diagram of RBP-HVDC

换流桥、换流变压器、直流场运行状态与系统容量的状态关系与 BP-HVDC 相同, 但直流线路运行状态与系统容量状态关系不同, 如表 3 所示。

表 3 RBP-HVDC 容量与直流线路运行状态关系

Table 3 Relationship between capacity of RBP-HVDC and operating states of DC transmission lines

运行状态	系统容量状态/%
正常运行	100
一极停运, 一极正常	100
双极停运	0

RBP-HVDC 与 BP-HVDC 可靠性逻辑的区别仅在于直流线路不同, 可看作比 BP-HVDC 多一条备用直流线路, 故不再赘述 RBP-HVDC 可靠性框图。

### 1.3 TP-HVDC 运行方式及可靠性框图

TP-HVDC 指在利用原有三相交流输电线路的基础上, 通过电流调制方法和换流站技术提升线路输电容量<sup>[18]</sup>。TP-HVDC 结构如图 5 所示(每个换流桥都是双 12 脉波串联换流桥), 其直流回路由双极和单极线路并联组成。有别于 BP-HVDC, 极 1 和极 2 中性点电流不流入大地, 通过具有双向通道的极 3 进行回流。极 3 接线形式为在常规换流阀两端反并

联晶闸管。极3可看作与极1和极2相并联的单极HVDC。

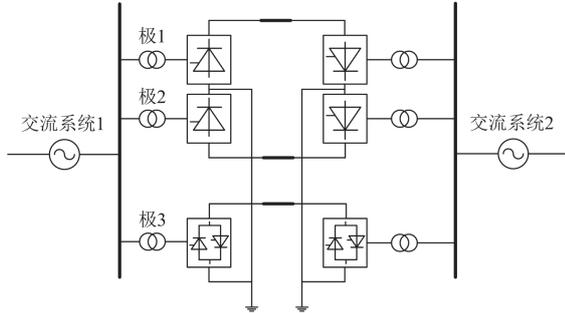


图5 TP-HVDC结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of TP-HVDC

TP-HVDC 传输容量与换流阀组、换流变压器运行状态的关系如表4所示，与直流线路、直流场运行状态关系如表5所示。

表4 TP-HVDC容量与换流阀组/换流变压器运行状态关系

Table 4 Relationship between TP-HVDC capacity and operating states of converter valve groups/converter transformers

运行状态	系统容量状态/%
三极正常运行	100
极1/极2部分停运, 另两极正常	83.33
极1/极2停运, 另两极正常	66.67
极1和极2部分停运, 极3正常	66.67
极1和极2正常, 极3停运	66.67
极1/极2部分停运, 极2/极1停运, 极3正常	50
极1和极2停运, 极3正常	33.33
极1和极2部分停运, 极3停运	33.33
极1/极2部分停运, 极2/极1停运, 极3停运	16.67
三极停运	0

表5 TP-HVDC容量与直流线路/直流场运行状态关系

Table 5 Relationship between TP-HVDC capacity and operating states of DC transmission line/DC devices

运行状态	系统容量状态/%
三极正常运行	100
一极停运, 另两极正常	66.67
两极停运, 一极正常	33.33
三极停运	0

绘制 TP-HVDC 可靠性框图如图6所示, V2为反并联晶闸管的换流桥子系统。TP-HVDC 可靠性框图可以看作 BP-HVDC 并联一单极 HVDC。

## 2 HVDC 可靠性模型及可靠性指标

### 2.1 基于参数矩阵化 FD 法的 HVDC 可靠性建模

采用参数矩阵化 FD 法<sup>[14]</sup>, 建立 BP-HVDC、

RBP-HVDC 和 TP-HVDC 可靠性模型。TP-HVDC 可靠性框图如图6所示, 建模过程如下。

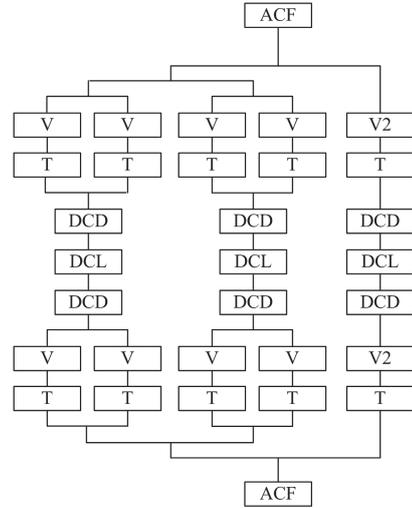


图6 TP-HVDC 可靠性框图

Fig. 6 Reliability diagram of TP-HVDC

Step1: 构建各元件参数矩阵, 包括容量矩阵、容量概率矩阵及状态转移矩阵。元件容量矩阵  $C$ 、状态转移率矩阵  $R$  可根据已知参数构造, 元件容量概率矩阵  $P$  可通过求解式(1)得到。

$$\begin{cases} PR = 0 \\ \sum p_i = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $p_i$  为元件处在状态  $i$  的稳态概率, 即元件容量概率矩阵  $P$  中第  $i$  个元素。

Step2: 构建子系统容量矩阵、容量概率矩阵、状态转移率矩阵。按照各子系统结构, 将各元件可靠性模型一一组合, 串联结构依式(2)、式(4)、式(5)组合, 并联结构依式(2)一式(5)组合, 得到各子系统可靠性模型; 按照系统可靠性框图, 组合子系统等效模型, 得到可靠性模型。

$$C_s^* = \min\{a_i, b_j\} \quad a_i \in C_1, b_j \in C_2 \quad (2)$$

$$C_s^* = a_i + b_j \quad a_i \in C_1, b_j \in C_2 \quad (3)$$

式中:  $C_1$ 、 $C_2$  分别为子系统 1、2 的容量矩阵;  $C_s^*$  为压缩前系统容量矩阵;  $a_i$  为矩阵  $C_1$  中的第  $i$  个元素;  $b_j$  为矩阵  $C_2$  中的第  $j$  个元素。

将矩阵  $C_s^*$  中的元素按照从大到小顺序排列, 得到系统容量矩阵  $C_s$ 。

根据各系统容量概率矩阵得到组合系统容量概率矩阵为

$$P_s^* = P_1^T P_2 \quad (4)$$

式中:  $P_1$ 、 $P_2$  分别为子系统 1、2 的容量概率矩阵;

$P_s^*$  为压缩前系统容量概率矩阵, 矩阵元素与压缩前系统容量矩阵  $C_s^*$  元素对应。

组合系统状态转移率矩阵为

$$R_s = \left\{ \lambda_{ij} \mid \lambda_{ij} = \frac{\sum_{c_{ab}=d_i, c_{hb}=d_j} \gamma_{ah} P_{ab} + \sum_{c_{gh}=d_i, c_{gq}=d_j} \eta_{hq} P_{gh}}{\sum_{c_{kl}=d_i} P_{kl}} \right\} \quad (5)$$

式中:  $R_s$  为组合系统状态转移率矩阵;  $\lambda_{ij}$  为系统从状态  $i$  到  $j$  的转移率;  $p_{kl}$ 、 $p_{ab}$ 、 $p_{gh}$  为矩阵  $P_s^*$  中元素, 下标表示元素所在行与列;  $c_{kl}$ 、 $c_{ab}$ 、 $c_{hb}$ 、 $c_{gh}$ 、 $c_{gq}$  为矩阵  $C_s^*$  中的元素, 下标表示元素所在行与列;  $d_i$ 、 $d_j$  分别为矩阵  $C_s$  中第  $i$  个、第  $j$  个元素;  $\gamma_{ah}$  为子系统 1 状态转移概率矩阵  $R_1$  中第  $a$  行、第  $h$  列元素;  $\eta_{hq}$  为子系统 2 状态转移概率矩阵  $R_2$  中的第  $h$  行、第  $q$  列元素。

Step3: 根据系统的矩阵  $P_s$  和矩阵  $R_s$ , 计算各容量状态的频率  $f_i$  及平均持续时间  $T_i$ 。

$$f_i = p_i \sum_{j \neq i} \lambda_{ij} \quad (6)$$

$$T_i = \frac{p_i}{f_i} \quad (7)$$

## 2.2 直流输电系统可靠性指标

能量可用率(energy availability, EA)  $P_{EA}$  表示为

$$P_{EA} = \sum_i c_i p_i \quad (8)$$

式中:  $c_i$  为  $C_s$  中第  $i$  个元素。

能量不可用率(energy unavailability, EU)  $P_{EU}$  表示为

$$P_{EU} = 100\% - P_{EA} \quad (9)$$

期望输送容量(expected capacity, EC)  $E_{EC}$  表示为

$$E_{EC} = C \times \sum_i c_i p_i = C \times P_{EA} \quad (10)$$

式中:  $C$  为 HVDC 额定输送容量。

## 3 交直流混联系统可靠性评估方法

为分析 HVDC 对交流系统可靠性的影响, 将 HVDC 可靠性模型嵌入交流系统可靠性评估方法。交流系统可靠性评估流程主要包括可靠性建模、系统状态选择、系统状态分析和可靠性指标计算。交流元件采用两状态(故障状态和正常状态)可靠性模型, HVDC 可靠性模型即 2.1 节所求容量矩阵  $C_s$ 、容量概率矩阵  $P_s$  和平均持续时间  $T_i$ ; 在系统状态选择时采用序贯蒙特卡洛法分别抽样交流元件和 HVDC 状态; 系统状态分析采用最优切负荷模型;

由切负荷计算结果计算系统可靠性指标。

### 3.1 序贯蒙特卡洛法

蒙特卡洛模拟法通过计算机生成多个随机数, 重复模拟系统运行状态, 统计得到可靠性指标<sup>[19-20]</sup>。

#### 1) 序贯蒙特卡洛法抽样交流元件状态

状态持续时间抽样法是序贯蒙特卡洛模拟法中最常用的方法, 通过循环抽样设备的运行时间和故障时间模拟系统运行过程, 直至达到仿真年限。常规发电机组、交流输电线路等元件采用两状态模型, 假设其平均无故障工作时间(mean time to failure, MTTF)和平均修复时间(mean time to repair, MTTR)均服从指数分布<sup>[21]</sup>。依式(11)和式(12)抽样得到交流元件无故障工作时间  $t_{TTF}$  和故障修复时间  $t_{TTR}$ 。

$$t_{TTF} = -\frac{1}{\lambda} \ln U_1 = -t_{MTTF} \ln U_1 \quad (11)$$

$$t_{TTR} = -\frac{1}{\mu} \ln U_2 = -t_{MTTR} \ln U_2 \quad (12)$$

式中:  $\lambda$  和  $\mu$  分别为元件故障率与修复率;  $U_1$ 、 $U_2$  为  $[0,1]$  区间两个相异随机数;  $t_{MTTF}$  和  $t_{MTTR}$  分别为元件平均无故障工作时间和平均故障修复时间。

#### 2) 双重蒙特卡洛法抽样 HVDC 状态

序贯蒙特卡洛法抽样 HVDC 状态的步骤略有不同, 由于 HVDC 有多种运行状态, 故先抽取一个随机数按式(13)计算当前状态持续时间, 再抽取一个随机数通过式(14)计算得到 HVDC 下一个状态<sup>[22]</sup>。

$$T_{DCi} = -T_i \ln(U_3) \quad i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (13)$$

式中:  $T_{DCi}$  为状态  $i$  的实际持续时间;  $U_3$  为  $[0,1]$  区间的随机数;  $n$  为状态总数。

$$S = \begin{cases} S_1 P_2 + P_3 + \dots + P_n < U_4 \leq 1 \\ S_2 P_3 + P_4 + \dots + P_n < U_4 \leq P_2 + P_3 + \dots + P_n \\ \vdots \\ S_n 0 \leq U_4 \leq P_n \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $S$  为抽样到的 HVDC 状态;  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $\dots$ 、 $S_n$  分别为 HVDC 的  $n$  种运行状态;  $P_2$ 、 $P_3$ 、 $\dots$ 、 $P_n$  分别为  $n$  种运行状态的概率, 即容量概率矩阵  $P_s$  中的元素;  $U_4$  为  $[0,1]$  区间的随机数。

### 3.2 最优切负荷模型及可靠性指标

对抽样的各系统状态进行分析, 若系统中发电机或输电线路发生故障, 则进行切负荷计算, 最优切负荷模型如下。

目标函数  $P_{Cx}$  为

$$\min \sum_{x \in N_C} P_{Cx} \quad (15)$$

约束条件为

$$\begin{cases} \mathbf{P}_G + \mathbf{P}_C - \mathbf{P}_D = \mathbf{B}\boldsymbol{\theta} \\ 0 \leq P_{Cx} \leq P_{Dx}, x \in N_C \\ P_{Gx,\min} \leq P_{Gx} \leq P_{Gx,\max}, x \in N_G \\ -P_{xy,\max} \leq P_{xy} = \frac{\theta_x - \theta_y}{X_{xy}} \leq P_{xy,\max} \end{cases} \quad (16)$$

式中： $N_C$  为负荷节点集合； $N_G$  为发电机节点集合； $\mathbf{P}_G$  为节点发电机注入有功功率向量； $\mathbf{P}_D$  为节点有功负荷向量； $\mathbf{P}_C$  为切负荷向量； $\mathbf{B}$  为用于直流潮流计算的节点电纳矩阵； $\boldsymbol{\theta}$  为节点电压相角向量； $P_{Cx}$  为节点  $x$  的切负荷量； $P_{Gx}$  为发电机组出力； $P_{Gx,\max}$ 、 $P_{Gx,\min}$  分别为发电机的有功出力上、下限； $P_{Dx}$  为节点  $x$  的有功负荷； $P_{xy}$  为通过线路  $xy$  的有功功率； $P_{xy,\max}$  为其传输容量极限； $\theta_x$  和  $\theta_y$  分别表示节点  $x$ 、 $y$  处的电压相位； $X_{xy}$  表示线路  $xy$  的电抗。

对每个系统状态按照时间顺序进行切负荷计算，得到切负荷小时数和切负荷量，以电力不足期望值(expected demand not supplied, EDNS)  $E_{EDNS}$  表征电力系统可靠性。

$$E_{EDNS} = \sum_{z \in Z} \frac{P_{Cz} t_z}{T_{\max}} \quad (17)$$

式中： $Z$  为切负荷事件集合； $P_{Cz}$  为状态  $z$  的切负荷量； $t_z$  为状态  $z$  的持续时间； $T_{\max}$  为总仿真时间。

### 3.3 交直流混联系统可靠性评估总体流程

交直流混联系统可靠性评估流程如图 7 所示。

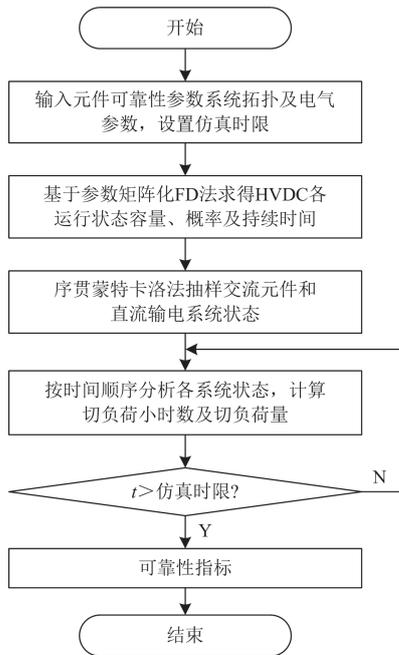


图 7 交直流混联系统可靠性评估流程图

Fig. 7 Reliability evaluation flowchart of AC/DC hybrid system

Step1: 输入各元件可靠性参数及系统电气参数，设置仿真时限。

Step2: 采用参数矩阵化 FD 法求得 HVDC 各运行状态容量、概率及持续时间。

Step3: 采用序贯蒙特卡洛抽样交流元件状态和直流输电系统状态。

Step4: 按时间顺序分析各系统状态，计算切负荷小时数及切负荷量。

Step5: 输出交直流混联系统可靠性指标。

## 4 算例分析

### 4.1 HVDC 可靠性评估

以某高压直流输电工程可靠性统计数据为本算例可靠性原始参数<sup>[17]</sup>，如表 6 所示。交流滤波器组运行状态与 HVDC 传输容量关系<sup>[14]</sup>如表 7 所示。

表 6 可靠性原始参数

组合元件	故障率/(次/年)	修复率/(次/年)
换流阀臂	0.355	1102.72
换流变压器	0.007	362.66
直流线路	4.708	1101.89
直流场	0.071	758.44
交流滤波器	0.306	625.72

表 7 交流滤波器运行状态与 HVDC 传输容量关系

Table 7 Relationship between transmission capacity of HVDC and operating states of AC filter

运行状态	系统容量状态/%
4 组均正常运行	100
停运 1 组	90
停运 2 组	60
停运 3 组	30
全部停运	0

由文献[18]可知，假设线路改造前后不改变额定电压和额定电流，不考虑元件过载能力时，双极 HVDC 的传输功率为交流线路的 1.15 倍，TP-HVDC 的传输功率为双极 HVDC 的 1.37 倍，即交流线路的 1.58 倍。换流变压器、平波电抗器和其他串联设备通常有 15% 短时过载能力，则此时双极 HVDC 输送功率为交流线路的 1.32 倍，TP-HVDC 输送功率为交流线路的 1.82 倍。因此，设置 BP-HVDC 和 RBP-HVDC 的线路容量为交流线路的 1.32 倍，TP-HVDC 的线路容量为交流线路的 1.82 倍。为计算直流输电系统可靠性指标 EC，设双极 HVDC 额定容量为 1000 MW，则 TP-HVDC 额定容量为 1580 MW。

结合系统参数，求得 3 种 HVDC 可靠性指标如

表 8 所示, 不同容量状态稳态概率及平均持续时间如表 9 所示。分析可知, RBP-HVDC 的 EA 最高, 其次是 BP-HVDC, 最后是 TP-HVDC, 但 TP-HVDC 的 EC 最高, RBP-HVDC 次之, BP-HVDC 最低。这是由于 TP-HVDC 中元件数目更多, EA 有所下降, 其额定运行时输送功率更大, EC 最大。

由表 9 可知, BP-HVDC 处于额定容量状态的概率最高, 为 95.55%, 其次是 75%容量状态, 再次是 50%容量状态, 其他容量状态概率很小; RBP-HVDC 处于 60%~100%容量状态的概率较 BP-HVDC

有所上升, 50%容量状态概率有所下降, 其他容量状态基本不变; TP-HVDC 相较于另两种输电系统容量状态增多, 额定容量状态概率较其他两种较低, 为 93.62%。

表 8 HVDC 可靠性指标

Table 8 Reliability indices of HVDC

指标	BP-HVDC	RBP-HVDC	TP-HVDC
EA/%	98.708	99.130	98.455
EU/%	1.292	0.870	1.545
EC/MW	987.08	991.30	1555.59

表 9 BP-HVDC、RBP-HVDC、TP-HVDC 不同容量状态概率、平均持续时间

Table 9 Capacity-probability-average duration of BP-HVDC, RBP-HVDC and TP-HVDC

容量状态/%	BP-HVDC		RBP-HVDC		TP-HVDC	
	概率	平均持续时间/h	概率	平均持续时间/h	概率	平均持续时间/h
100	0.9555	186.7804	0.9636	233.6969	0.9362	127.0338
90	0.0037	13.0653	0.0038	13.2514	0.0037	12.6491
83.33	—	—	—	—	0.0310	7.8929
75	0.0316	8.0604	0.0319	8.1308	—	—
66.67	—	—	—	—	0.0282	7.7180
60	$2.838 \times 10^{-6}$	6.9389	$2.8623 \times 10^{-6}$	6.9911	$2.8615 \times 10^{-6}$	6.9849
50	0.0090	7.6417	$6.9658 \times 10^{-4}$	6.2087	$7.7871 \times 10^{-4}$	4.0432
33.33	—	—	—	—	$2.0153 \times 10^{-4}$	3.9447
30	$9.337 \times 10^{-10}$	4.6650	$9.3382 \times 10^{-10}$	4.6658	$9.3382 \times 10^{-10}$	4.6658
25	$1.444 \times 10^{-4}$	4.0565	$7.1499 \times 10^{-7}$	4.3276	—	—
16.67	—	—	—	—	$2.9110 \times 10^{-6}$	2.7073
0	$2.002 \times 10^{-5}$	4.0003	$5.0872 \times 10^{-8}$	0.8297	$4.0352 \times 10^{-7}$	2.682 92

注: 表中“—”表示无该状态。

#### 4.2 HVDC 元件可靠性参数灵敏度分析

为分析元件参数对 HVDC 可靠性的影响, 进行参数灵敏度分析。当变量间函数关系不明确时, 假定其他元件故障率不变, 所研究的元件故障率增加 1%, 分析系统可靠性指标相对变化量。分别对交流滤波器、换流变压器、换流阀臂、直流线路和直流场的故障率进行灵敏度分析, 如表 10 所示。分析可知, 3 种 HVDC 中换流阀臂故障率对 HVDC 可靠性的影响均最大, 因为每个换流桥子系统由 6 个晶闸

表 10 HVDC 元件可靠性参数灵敏度分析

Table 10 Reliability parameter sensitivity analysis of

HVDC component

元件	系统能量不可用率相对变化量/%		
	BP-HVDC	RBP-HVDC	TP-HVDC
交流滤波器	0.029 05	0.043 49	0.023 80
换流阀臂	0.587 06	0.875 18	0.648 98
换流变压器	0.035 21	0.052 49	0.029 39
直流线路	0.324 94	$5.07419 \times 10^{-7}$	0.270 18
直流场	0.0143	0.021 32	0.011 92

管阀臂组成, 任一阀臂故障均会导致换流桥故障, 从而减少系统传输功率, 该元件故障对系统可靠性影响最大。

#### 4.3 交直流混联系统可靠性评估

以 IEEE-RTS79 系统为算例, 含 32 台发电机、33 条线路、5 台变压器、24 条母线, 系统总装机容量为 3405 MW, 峰荷为 2850 MW。系统单线图如图 8 所示, 元件可靠性参数及电气参数见文献[23], 其中线路 10 原始参数如表 11 所示。

由  $t_{MTTF}$  和  $t_{MTTR}$  可求出线路 10 故障概率为  $\frac{t_{MTTR}}{t_{MTTF} + t_{MTTR}} = 5.02 \times 10^{-4}$ , 可见交流线路故障概率远低于 HVDC 的 EU。

##### 4.3.1 交改直对无新能源系统可靠性影响

###### 1) 不同交改直结构对系统可靠性的影响

以线路 10 为例, 分别将线路 10 改造为 BP-HVDC、RBP-HVDC 和 TP-HVDC。负荷模型采用峰值负荷模型。系统可靠性指标计算结果如表 12 所示。分析可知, 在该算例下, 交改直对系统可靠

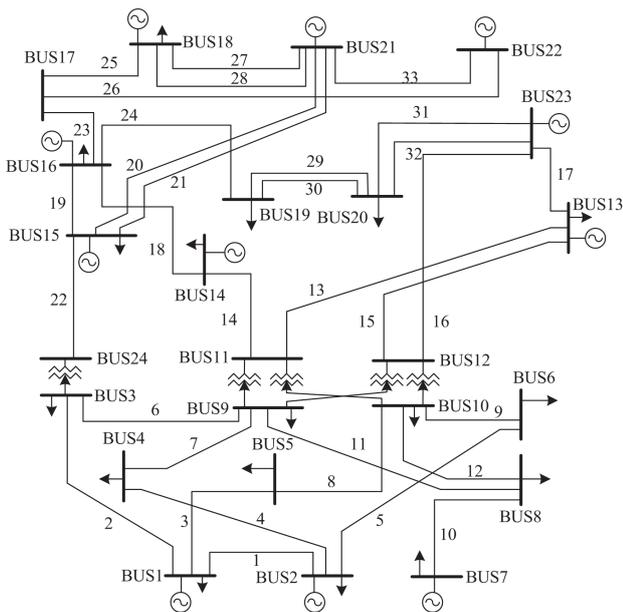


图 8 IEEE-RTS79 系统单线图

Fig. 8 Single-line diagram of IEEE-RTS79 system

表 11 线路 10 原始参数

Table 11 Original parameters of line 10

$t_{MTTF}/h$	$t_{MTR}/h$	线路传输容量极限/MW
19 909	10	175

表 12 不同交改直结构下的系统可靠性指标

Table 12 Reliability indicators of different AC/DC system

交改直结构	EDNS/MW	EDNS 变化率/%
—	14.4124	—
BP-HVDC	14.4447	0.224
RBP-HVDC	14.4310	0.129
TP-HVDC	14.4080	-0.031

性影响微弱, BP-HVDC 和 RBP-HVDC 会使 EDNS 上升, 即系统可靠性略微下降, TP-HVDC 会使系统可靠性水平略微升高。这是由于 HVDC 的 EU 比交流线路的故障概率大, 因此会使系统可靠性变差, 但 TP-HVDC 增容能力较双极 HVDC 更强, 一定程度上弥补了 EU 较小的缺陷。

2) 不同线路原始容量对系统可靠性的影响

图 9 为在线路 10 不同原始容量下直流改造后系统的可靠性指标计算结果。

分析可知, 当线路容量较小时, 交改直能够通过提升线路容量而改善系统可靠性, 但当线路容量本身较大时, 线路容量不再是制约系统可靠性的关键因素, 故再通过直流改造方式增大线路容量并不会使系统可靠性明显提高, 甚至因其故障概率高于交流线路而使系统可靠性下降。

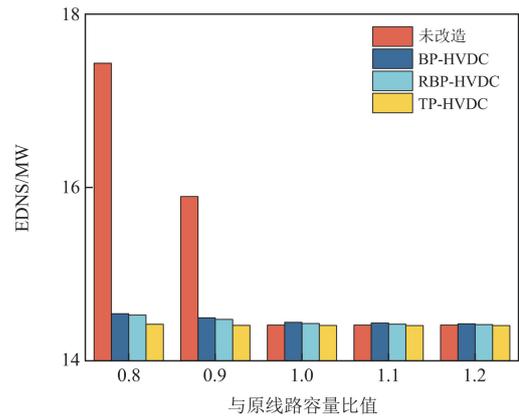


图 9 不同线路容量下直流改造后系统可靠性指标

Fig. 9 System reliability indicators after DC retrofitting under different line capacities

3) 换流阀臂备用对系统可靠性的影响

由 4.2 节可知, 换流阀臂故障率对 HVDC 可靠性的影响最大。假设系统中有备用换流阀臂, 备用阀臂安装时间为 0.5 h, 对线路 10 进行直流改造, 系统可靠性计算结果如表 13 所示。系统配置有备用换流阀臂可以使交改直后系统可靠性提高, 备用换流阀臂安装时间比修复时间短, 换流阀臂故障所引起的系统停运时间将缩短, 从而提高系统可靠性。

表 13 有无换流阀备用下直流改造后系统可靠性指标

Table 13 System reliability indicators after DC retrofitting with and without converter valve redundancy

交改直结构	EDNS/MW	
	无备用换流阀臂	有备用换流阀臂
BP-HVDC	14.4447	14.4339
RBP-HVDC	14.4310	14.4088
TP-HVDC	14.4080	14.4067

4.3.2 交改直对新能源接入系统可靠性的影响

为模拟新能源远距离外送场景, 在节点 7 接入不同容量风光机组, 风光接入比为 1:1, 风光出力数据取自某地区全年 8760 h 的历史数据, 负荷模型为时序负荷模型, 对与节点 7 相连的线路 10 进行直流改造, 可靠性指标计算结果如图 10 所示, 风光消纳率计算结果如图 11 所示。分析可知, 在原系统中提高风光容量, 系统可靠性提升不大, 这是由于线路 10 传输容量极限仅为 175 MW, 风光机组受线路容量约束无法外送, 风光消纳率较低, 可靠性增益受到影响。当风光容量为 500 MW 时, 相较于原系统可靠性提升约 40%, 风光消纳率提升约 20%; 三极直流改造对系统可靠性提升最大, 相较于原系统可靠性提升约 68%, 风光消纳率提升约 46%。

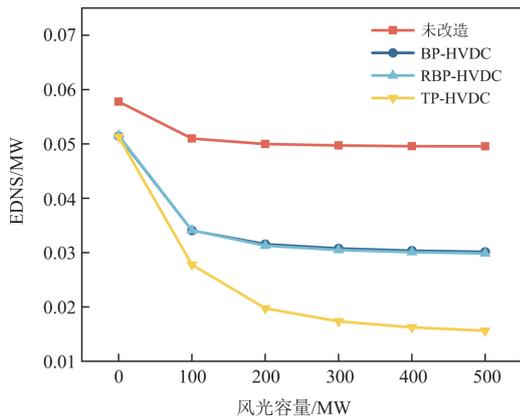


图 10 不同风光容量下直流改造后系统可靠性指标

Fig. 10 System reliability indicators after DC retrofitting under varying wind-PV capacity conditions

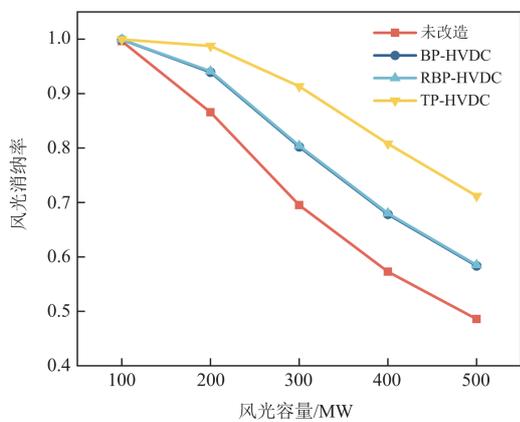


图 11 不同风光容量下直流改造后风光消纳率

Fig. 11 Wind-PV accommodation rate after DC retrofitting under varying renewable energy capacity conditions

## 5 结论

针对交流输电线路直流改造后的交直流混联系统可靠性评估问题, 采用参数矩阵化 FD 法建立直流输电系统可靠性模型, 基于序贯蒙特卡洛法评估交改直方案对交直流混联系统可靠性的影响。通过理论建模与算例分析, 得出以下研究结论。

1) HVDC 在提升传输容量的同时, 能量可用率较原交流系统略有下降。TP-HVDC 凭借更高的传输容量, 其期望输送容量显著提升, 虽能量可用率略低, 但综合增容效果可弥补可靠性损失, 在线路改造中能小幅提升系统可靠性。

2) 交改直对系统可靠性影响与线路原有容量裕度密切相关。对于长期接近容量极限的线路, 直流改造可提升传输能力; 而对于容量充裕的线路, 改造可能因输电系统复杂化导致指标轻微劣化。实际工程中有必要结合线路容量极限与走廊资源约束

进行规划分析。

3) 受线路容量约束, 新能源消纳率随装机容量提升而降低, 对线路进行直流改造在确保系统可靠性的同时, 可提升新能源消纳率。

## 参考文献

- [1] 李康, 黄萌, 查晓明, 等. 高压直流输电系统可靠性分析方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 174-187. LI Kang, HUANG Meng, ZHA Xiaoming, et al. An overview of reliability analysis methods for an HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 174-187.
- [2] MORADI-SEPAHVAND M, AMRAEE T. Hybrid AC/DC transmission expansion planning considering HVAC to HVDC conversion under renewable penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(1): 579-591.
- [3] 李周, 王宇涵, 顾伟, 等. 直流电网及其运行控制策略发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(24): 1-21. LI Zhou, WANG Yuhan, GU Wei, et al. Development trend of DC power grid and its operation control strategies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(24): 1-21.
- [4] ZHANG Lu, LIANG Jun, TANG Wei, et al. Converting AC distribution lines to DC to increase transfer capacities and DG penetration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1477-1487.
- [5] LARRUSK AIN D M, ZAMORA I, ABARRATEGUI O, et al. VSC-HVDC configurations for converting AC distribution lines into DC lines[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 54: 589-597.
- [6] 吴婧, 文俊, 温家良, 等. 高压直流三极输电特性分析[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 71-76. WU Jing, WEN Jun, WEN Jialiang, et al. Characteristic analysis of tripole HVDC power transmission[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 71-76.
- [7] REED L, MORGAN M G, VAISHNAV P, et al. Converting existing transmission corridors to HVDC is an overlooked option for increasing transmission capacity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019, 116(28): 13879-13884.
- [8] 李康, 黄萌, 查晓明, 等. 考虑模块冗余和系统状态的多端柔性直流输电系统可靠性的蒙特卡洛分析[J]. 电网技术, 2025, 49(1): 333-342. LI Kang, HUANG Meng, ZHA Xiaoming, et al. Monte Carlo analysis of reliability of MMC-MTDC considering module redundancy and system state[J]. Power System Technology, 2025, 49(1): 333-342.
- [9] RAMEZANZADEH S P, MIRZAIIE M, SHAHABI M.

- Reliability assessment of different HVDC transmission system configurations considering transmission lines capacity restrictions and the effect of load level[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 128.
- [10] XIE Kaigui, HU Bo, SINGH C. Reliability evaluation of double 12-pulse ultra HVDC transmission systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 31(1): 210-218.
- [11] 李凌飞, 许树楷, 姬煜轲, 等. 考虑元件参数不确定性的高压直流输电系统可靠性区间评估[J]. *南方电网技术*, 2022, 16(8): 94-103.  
LI Lingfei, XU Shukai, JI Yuke, et al. Reliability interval assessment of HVDC transmission system considering component parameter uncertainty[J]. *Southern Power System Technology*, 2022, 16(8): 94-103.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 谢海鹏, 何剑, 别朝红, 等. 基于二阶锥切负荷模型的大规模交直流混联电网可靠性评估[J]. *电网技术*, 2016, 40(12): 3761-3767.  
XIE Haipeng, HE Jian, BIE Zhaohong, et al. Reliability evaluation of large-scale hybrid AC/DC grids based on SOCP load shedding model[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(12): 3761-3767.
- [16] 谢绍宇, 王秀丽, 王锡凡. 交直流混联系统可靠性评估[J]. *电力自动化设备*, 2011, 31(7): 10-16.  
XIE Shaoyu, WANG Xiuli, WANG Xifan. Reliability estimation of AC/DC hybrid power system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2011, 31(7): 10-16.
- [17] 陈永进, 任震. 模型组合及其在直流输电系统可靠性评估中的应用[J]. *电网技术*, 2004, 28(13): 18-22.  
CHEN Yongjin, REN Zhen. Models combination and its application in reliability evaluation for HVDC systems[J]. *Power System Technology*, 2004, 28(13): 18-22.
- [18] 文俊, 温家良, 殷威扬, 等. 高压直流三极输电技术[J]. *电网技术*, 2013, 37(8): 2336-2342.  
WEN Jun, WEN Jialiang, YIN Weiyang, et al. Technology of tripole HVDC transmission[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(8): 2336-2342.
- [19] FIROUZI M, SAMIMI A, SALAMI A. Reliability evaluation of a composite power system in the presence of renewable generations[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 222.
- [20] 李轩, 王伟. 基于负荷可行域的可靠性约束机组组合模型及其两阶段求解方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(17): 91-101.  
LI Xuan, WANG Wei. A reliability-constrained unit commitment model based on load feasible region and its two-stage solution method[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(17): 91-101.
- [21] 周焱桥, 李觉友, 陈果, 等. 计及高比例风电电力系统运行可靠性的分布鲁棒优化建模与评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(11): 116-124.  
ZHOU Yanqiao, LI Jueyou, CHEN Guo, et al. Distributionally robust optimization modeling and evaluation of power system operational reliability with high wind power penetration[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(11): 116-124.
- [22] 刘文霞, 蒋程, 张建华, 等. 一种用于序贯蒙特卡罗仿真的风电机组多状态可靠性模型[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(8): 73-80.  
LIU Wenxia, JIANG Cheng, ZHANG Jianhua, et al. A multistage reliability model of wind turbines for sequential Monte Carlo simulation[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(8): 73-80.
- [23] SUBCOMMITTEE P M. IEEE reliability test system[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1979, PAS-98(6): 2047-2054.

收稿日期: 2025-07-17; 修回日期: 2025-10-10

作者简介:

刘晓明(1968—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代开关电器与系统; E-mail: liuxiaoming@hebut.edu.cn

沈伊南(2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为新型电力系统控制与保护. E-mail: 2755174921@qq.com

(编辑 许威)