

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.04.012

基于改进点估计法的 HVAC/DC 系统可靠性评估

赵佳琪, 冯宁, 王越

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 高压交直流(high voltage alternating current/direct current, HVAC/DC)系统结构复杂,元件种类繁多,采用传统方法进行可靠性评估计算量庞大。为改善 HVAC/DC 系统可靠性评估效率,文中提出一种基于改进点估计法的 HVAC/DC 系统可靠性评估方法。该方法分析 HVAC/DC 系统中各类元件的结构,用狄拉克函数将表示元件状态的离散随机变量进行连续化,使元件状态能够与系统中的负荷、风电等连续随机变量统一采用点估计法进行处理。将点估计法嵌入非线性最小切负荷量进行优化,通过有限次的优化计算可快速估计各种可靠性指标。最后,采用 IEEE 14 系统改进后的 HVAC/DC 测试系统分析论证该方法的可用性和局限性。结果表明,该方法在一定条件下能够有效减少 HVAC/DC 系统可靠性评估的计算量,具有良好的精度和效率表现。

关键词: 高压交直流(HVAC/DC)系统;电压源换流站可靠性模型;风电并网;可靠性评估;点估计法;狄拉克函数

中图分类号: TM744

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)04-0110-09

0 引言

近年来,随着风、光等新能源发电比例的不断提高,直流输电技术发展迅速,大量电力电子设备接入电力系统。一方面,电力电子元件具有响应速度快、过流能力弱、惯性小或无惯性等特点,严重影响电力系统的安全稳定运行^[1];另一方面,新能源的波动性及不确定性给系统的供电可靠性带来挑战^[2-5]。因此,对作为新能源主要传输通道的高压交直流(high voltage alternating current/direct current, HVAC/DC)系统开展可靠性评估,进而发现并改进系统薄弱环节,具有十分重大的意义。

HVAC/DC 系统包含的元件种类更多,结构更加复杂,需要针对其特点改进与更新可靠性评估方法。文献[6]将故障分析模型与蒙特卡洛法结合,提出了考虑条件相关故障的 HVAC/DC 系统可靠性评估框架。文献[7]提出一种基于二阶锥规划切负荷模型和蒙特卡洛法的 HVAC/DC 可靠性评估方法,对切负荷计算模型进行改进,有效提高了计算效率。文献[8]提出一种区间可靠性评估模型,能有效提高可再生能源并网情况下的 HVAC/DC 系统可靠性评估效率。文献[9]将准蒙特卡洛法与 PSD-BPA 软件仿真结合,建立 HVAC/DC 系统中各部件的可靠性模型,有效均衡了可靠性评估精度与效率。文献[10]提出一种半马尔可夫随机过程模型,用于描述任意分布下 HVAC/DC 系统元件的运行可靠性,从而实现对含远程风电场的 HVAC/DC 系统的可靠性评估。文献[11]建立了计及新能

源以及交直流系统相互作用的最小切负荷模型,并在枚举法基础上进行 HVAC/DC 系统可靠性评估。文献[12]提出一种基于蒙特卡洛方法和暂态稳定分析方法的考虑暂态安全约束的 HVAC/DC 系统可靠性评估方法。文献[13]对有功调整模型进行扩展以模拟远距离输电及系统互联等场合下的高压直流(high voltage direct current, HVDC)系统,并研究了网损、电压等因素对系统可靠性的影响。文献[14]建立了计及主力输电系统实际运行特性的 HVAC/DC 最小切负荷模型。文献[15]则建立了同时考虑 HVDC 稳态特性、发输电网络故障率以及输电线路有功限制的 HVAC/DC 系统可靠性模型。文献[16]考虑风速相关性和恶劣天气对元件参数的影响,构建了整个海上风电场及柔性直流并网系统的可靠性评估模型。

上述研究从考虑新能源等因素影响、计算效率等多个方面对 HVAC/DC 系统可靠性评估方法进行改进,可见,关于 HVAC/DC 系统可靠性评估方法已取得一定进展。目前,新能源应用日益广泛,系统的运行条件变化频繁,对 HVAC/DC 系统的可靠性评估计算效率进行提升十分重要,属于热点问题。鉴于此,文中提出一种基于改进点估计法的 HVAC/DC 系统可靠性评估方法。传统点估计法可用于处理系统中的连续变量,其基本思想为按照特定规则提取负荷、风电等连续随机变量的有限个估计点,经有限次最优潮流计算后得到目标函数的统计特征值^[17]。传统点估计法未涉及元件故障等离散随机变量,文中通过划分子系统的方法使 HVAC/DC 系统的各元件状态转化为若干 0-1 离散变量。通过狄拉克函数将 HVAC/DC 系统可靠性评估中涉

收稿日期: 2024-12-19; 修回日期: 2025-03-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52377127)

及的离散变量转化为连续变量,以最小切负荷为目标函数,将元件状态与系统涉及的连续变量一并视为系统随机扰动变量。采用点估计法对所有随机变量统一处理后,经有限次最优潮流计算,最终归纳为系统可靠性指标。文中将点估计法与 HVAC/DC 系统元件结构理论相结合,使点估计法能够描述 HVAC/DC 系统元件的特点;采用点估计法同时考虑系统中的离散变量和连续变量,以实现 HVAC/DC 系统可靠性评估效率的提升。在以 IEEE 14 系统为基础改进的 HVAC/DC 测试系统上对所提方法进行检验,论证该方法的可行性,并讨论了其适用范围。

1 基于点估计法的 HVAC/DC 系统可靠性评估

1.1 基本框架

可靠性评估中通常采用离散变量表示各个元件的状态,以便分析不同元件状态下系统的最小切负荷。HVAC/DC 系统中包含的元件种类繁多,文中主要考虑发电机、交流输电线路、直流输电线路、换流站 4 类元件。图 1 为 HVAC/DC 系统可靠性评估的框架。

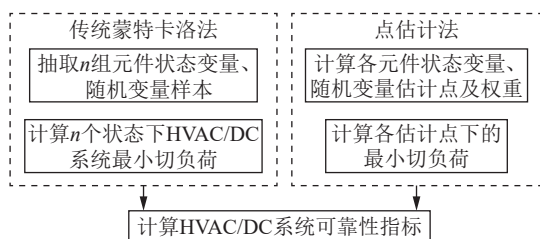


图 1 HVAC/DC 系统可靠性评估框架
Fig.1 Framework of HVAC/DC system reliability evaluation

1.2 元件模型

1.2.1 发电机及交流输电线路

发电机及交流输电线路均采用两状态模型:正常状态和故障状态,通常用 0-1 离散变量表示,其分布规律为:

$$\begin{cases} P(X_b = 1) = p_b \\ P(X_b = 0) = q_b \end{cases} \quad (1)$$

式中: P 为概率函数; X_b 为用于表示一元件状态的 0-1 离散变量; p_b 、 q_b 分别为该元件处于正常状态和故障状态的概率。 p_b 与 q_b 可根据该元件的可靠性参数(故障率及修复时间)进行计算得到^[18]。

1.2.2 VSC 换流站及直流输电线路

电压源换流器(voltage source converter, VSC)换流站及直流输电线路常采用三状态模型表示:全额运行(运行容量 100%)、降额运行(运行容量 50%)

和停运(运行容量 0%)。为方便下文采用点估计法进行处理,对 VSC 换流站及直流线路的结构进行划分,转化为两状态模型。

图 2 为基于电压源换流器的高压直流输电(high voltage direct current based on voltage source converter, VSC-HVDC)系统的结构,包含两端的 VSC 换流站(VSC₁、VSC₂)和中间的直流输电线路,其中 VSC₁、VSC₂ 的结构完全相同,VSC-HVDC 系统为一对称结构。

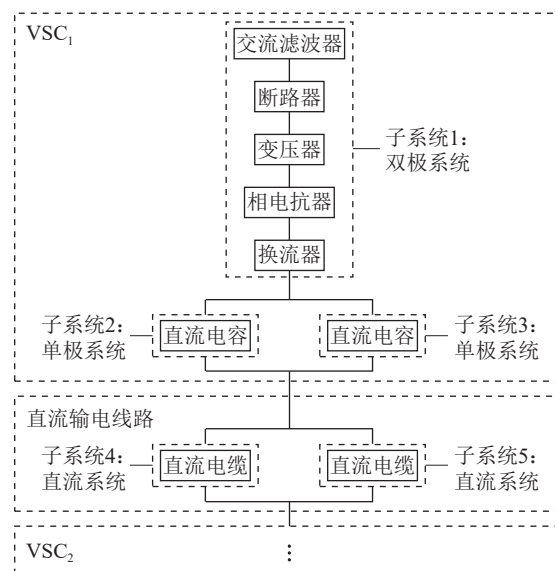


图 2 VSC-HVDC 系统结构
Fig.2 Structure of VSC-HVDC system

直接对 VSC-HVDC 系统结构进行分析十分困难,因此将 VSC 换流站划分为若干子系统。

(1) 双极系统。每个 VSC 换流站有一个双极系统,由不同元件串联形成,该系统内任一元件发生故障,VSC 换流站停运。图 2 中子系统 1 为 VSC₁ 的双极系统。

(2) 单极系统。每个 VSC 换流站有两个并联的单极系统,若一个单极系统故障,VSC 换流站运行容量降为 50%;若两个单极系统同时故障,VSC 换流站停运。图 2 中单极系统由单一元件构成,子系统 2、3 为 VSC₁ 的单极系统。

直流输电线路由两个并联的直流子系统组成。当一个直流系统故障时,直流输电线路的容量降为初始容量的 50%;若两个直流系统同时故障,则直流输电线路停运。图 2 中子系统 4、5 为同一直流输电线路的并联子系统。

每个子系统均可由一个 0-1 变量表示,基于这种表示方式,VSC 换流站状态可由 3 个独立 0-1 变量表示,直流输电线路的容量可由 2 个独立 0-1 变量表示。

其中, VSC 换流站的双极系统是一个由多个两状态 0-1 元件串联而成的串联等值系统, 其等值故障率与修复时间可分别由式(2)、式(3)计算得到^[19]。

$$\lambda_s = \sum_{g=1}^G \lambda_g \quad (2)$$

$$r_s = \sum_{g=1}^G \lambda_g r_g / \sum_{g=1}^G \lambda_g \quad (3)$$

式中: λ_s 为串联等值系统故障率; λ_g 为串联等值系统中第 g 个元件的故障率; r_s 为串联等值系统修复时间; r_g 为串联等值系统中第 g 个元件的修复时间; G 为串联等值系统中串联元件总数, VSC 双极系统中 $G = 5$ 。

1.2.3 风机

风速的变化被近似认为服从双参数 Weibull 分布, 其概率密度函数^[20]为:

$$g(y) = \begin{cases} \frac{a}{b} \left(\frac{y}{b}\right)^{a-1} \exp\left(-\left(\frac{y}{b}\right)^a\right) & y \geq 0 \\ 0 & y < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $g(y)$ 为风速服从的概率密度函数; a 、 b 分别为 Weibull 分布的形状参数和尺度参数。

忽略电气损耗和风电场尾流等其他因素对风电场的影响, 风速 v 与风电机组输出功率 $P_o(v)$ 之间的近似函数关系为:

$$P_o(v) = \begin{cases} 0 & 0 \leq v < v_{ci}; v \geq v_{co} \\ \frac{v - v_{ci}}{v_R - v_{ci}} P_R & v_{ci} \leq v < v_R \\ P_R & v_R \leq v < v_{co} \end{cases} \quad (5)$$

式中: v_{ci} 为风电机组切入风速; v_{co} 为风电机组切出风速; v_R 为风电机组额定风速; P_R 为风电机组额定输出功率。

1.2.4 负荷

电力系统可靠性评估中, 负荷的不确定性通常采用高斯分布描述, 分布函数的均值和方差之间一般具有特定关系。参照文献[21], 文中将高斯分布的标准差与均值之比定义为变异系数, 并假设负荷服从某一给定均值和变异系数的正态分布。

1.3 HVAC/DC 系统最小切负荷模型

HVAC/DC 系统可靠性评估通过最优潮流计算进行最小切负荷分析, 以衡量模拟系统状态故障的严重程度, 从而确定各种可靠性指标。

文中研究的 HVAC/DC 系统采用基于电压源换流器的直流输电技术, 即 VSC-HVDC。HVAC/DC 系统由交流子系统、直流子系统以及 VSC 换流器子系统三部分组成。由于换流器的隔离作用, 直流子系统和交流子系统的潮流约束产生变化。文中采用等效的方式, 将直流系统等效为电抗为 0 的

交流系统, 将 VSC 换流器等效为发电机, 从而建立一个统一的虚拟交流模型, 并用交流系统最小切负荷模型对其进行描述^[22]。该方法在准确描述 HVAC/DC 系统特点并保证计算精度的前提下, 使 HVAC/DC 系统最小切负荷模型的求解更加简单。图 3 为等效后的 HVAC/DC 系统模型。

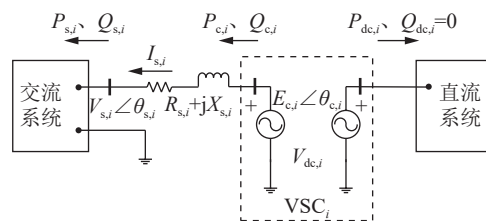


图 3 HVAC/DC 系统等效模型

Fig.3 HVAC/DC system equivalent model

图 3 中, i 为 VSC 换流站编号; $R_{s,i} + jX_{s,i}$ 为 VSC _{i} 换流站的换流变压器等效阻抗; $P_{c,i}$ 、 $Q_{c,i}$ 分别为 VSC _{i} 注入交流侧的有功功率、无功功率; $P_{s,i}$ 、 $Q_{s,i}$ 分别为注入交流系统的有功功率、无功功率; $P_{dc,i}$ 、 $Q_{dc,i}$ 分别为注入直流系统的有功功率、无功功率; $V_{s,i} \angle \theta_{s,i}$ 为 VSC _{i} 换流站与交流系统连接处的电压; $I_{s,i}$ 为流过 VSC _{i} 的电流; $E_{c,i} \angle \theta_{c,i}$ 为 VSC _{i} 交流侧端电压; $V_{dc,i}$ 为 VSC _{i} 直流侧端电压。基于该等效模型, 在交流系统最小切负荷模型的基础上加入如下约束, 建立 HVAC/DC 系统最小切负荷模型。

(1) VSC 换流器约束。

$$P_{dc,i} + P_{c,i} + P_{loss,i} = 0 \quad (6)$$

$$P_{loss,i} = a_i + b_i I_{s,i} + c_i I_{s,i}^2 \quad (7)$$

$$0 \leq E_{c,i} \leq m_i V_{dc,i} \quad (8)$$

$$m_i = \sqrt{\frac{3}{2}} \times \frac{V_{dc,B}}{V_{ac,B}} \quad (9)$$

式中: $P_{loss,i}$ 为 VSC _{i} 的功率损耗; a_i 、 b_i 、 c_i 为 VSC _{i} 的损耗系数, 均为常数; m_i 为 VSC _{i} 的调制指数; $V_{dc,B}$ 为直流系统电压等级; $V_{ac,B}$ 为交流系统电压等级。

(2) VSC 换流站和直流线路的热极限约束及电压约束。

$$P_{c,i}^2 + Q_{c,i}^2 \leq S_{vsc,i}^2 \quad \forall i \in A_{vsc} \quad (10)$$

$$0 \leq |I_{cc,f_1}| \leq I_{cc,f_1}^{\max} \quad \forall f_1 \in A_{dcbranch} \quad (11)$$

$$V_{dc,i}^{\min} \leq V_{dc,i} \leq V_{dc,i}^{\max} \quad \forall i \in A_{vsc} \quad (12)$$

式中: A_{vsc} 、 $A_{dcbranch}$ 分别为 VSC 换流站、直流线路的集合; $S_{vsc,i}$ 为 VSC _{i} 换流站的最大容许容量; I_{cc,f_1} 为直流线路 f_1 的电流; 上标“max”和“min”分别表示变量的上限和下限。

VSC-HVDC 控制方式灵活多变, 主要有以下 4 种: ① 定直流电压、定无功功率控制; ② 定直流

电压、定交流电压控制;③定有功功率、定无功功率控制;④定有功功率、定交流电压控制^[23]。根据实际应用情况决定 VSC 换流站的控制方式。

上述 HVAC/DC 系统最小切负荷模型为非线性模型,可在 MATLAB 中调用 ipopt 求解器进行求解。

1.4 HVAC/DC 系统可靠性指标

期望缺供电量(expected energy not supplied, EENS)是常见的电力系统可靠性指标^[24-26],用于刻画因输变电设备强迫停运和源荷波动而引起的电量不足的统计特征。在运用点估计法进行计算时,有:

$$E_{ENS} = 8760 \sum_{x_a \in X_a} p(x_a) D(x_a) \quad (13)$$

式中: E_{ENS} 为 EENS 指标; X_a 为系统特征状态集合; $p(x_a)$ 为特征状态 x_a 对应的权重; $D(x_a)$ 为特征状态 x_a 的最小切负荷量。特征状态和权重的概念和计算过程将在第 2 章进行介绍。

点估计法在原理上同样适用于其他可靠性指标估计,只需要改变系统状态严重度评价函数 $D(x_a)$ 的定义即可。计算 EENS 时,其严重度函数被定义为最小切负荷量;如果计算供电不足概率(loss of load probability, LOLP),则可将严重度函数定义为切负荷事件的 0-1 指示函数。以此类推,如果计算供电时间不足期望(loss of load expectation, LOLE),可以将其定义为系统状态的停电时长。

2 改进点估计法

2.1 基本原理

点估计法的原理是将 n 维随机变量 X 的映射函数 $Z = h(X)$ 作泰勒级数展开,用 X 的高阶矩,在 m 个点上对 Z 做 $m \times n$ 次估计得到 Z 的概率密度^[17,27-28]。

设 $Z = h(X_1, X_2, \dots, X_n)$, 在每个随机变量 $X_k (k = 1, 2, \dots, n)$ 上提取 m 个估计点,即:

$$x_{k,w} = \mu_k + \xi_{k,w} \sigma_k \quad w = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

式中: μ_k 为 X_k 的均值; $\xi_{k,w}$ 为估计点 $x_{k,w}$ 的位置系数; σ_k 为 X_k 的标准差。

定义 X_k 的第 w 个估计点 $x_{k,w}$ 权重为 $p_{k,w}$, 且须满足以下关系:

$$\sum_{w=1}^m p_{k,w} = \frac{1}{n} \quad (15)$$

$$\sum_{w=1}^m p_{k,w} (\xi_{k,w})^j = \lambda_{k,j} \quad j = 1, 2, \dots, 2m-1; k = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

其中, j 阶中心矩与标准差的 j 次方之比 $\lambda_{k,j}$ 可由式(17)进行计算得到, $\lambda_{k,3}$ 为 X_k 的偏度系数, $\lambda_{k,4}$ 为

X_k 的峰度系数。

$$\begin{cases} M_j(X_k) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu_k)^j f(x) dx \\ \lambda_{k,j} = \frac{M_j(X_k)}{(\sigma_k)^j} \quad j = 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (17)$$

式中: $f(x)$ 为随机变量 X_k 的概率密度函数; $M_j(X_k)$ 为 X_k 的 j 阶中心矩。

给定随机变量的概率密度,联立式(14)—式(17)即可得到各随机变量的估计点 $x_{k,w}$ 及其相应权重 $p_{k,w}$,再代入式(18)可求得 Z 的 l 阶矩估计。

$$E(Z^l) \approx \sum_{k=1}^n \sum_{w=1}^m p_{k,w} (h(\mu_1, \mu_2, \dots, x_{k,w}, \dots, \mu_n))^l \quad (18)$$

式中: $E(\cdot)$ 为期望函数。当 $l = 1$ 时,式(18)即计算 Z 的均值,可用于常用的可靠性指标计算,如 EENS。

2.2 连续型随机变量的点估计法

根据 1.2 节,文中所研究的 HVAC/DC 系统的连续随机变量包括负荷及风电出力,通过 1.2 节处理方法得到负荷及风速分布的概率密度函数。实际应用中通常选取 $m = 3$,即 X_k 的均值 μ_k 及其左右邻域内各一点,共 3 个点,此时可利用 X_k 的四阶矩信息得到位置系数 $\xi_{k,w}$ 及权重 $p_{k,w}$ ^[29] 分别为:

$$\begin{cases} \xi_{k,w} = \frac{\lambda_{k,3}}{2} + (-1)^{3-w} \sqrt{\lambda_{k,4} - \frac{3\lambda_{k,3}^2}{4}} & w = 1, 2 \\ \xi_{k,3} = 0 \\ p_{k,w} = \frac{(-1)^{3-w}}{\xi_{k,w} (\xi_{k,1} - \xi_{k,2})} & w = 1, 2 \\ p_{k,3} = \frac{1}{n} - p_{k,1} - p_{k,2} = \frac{1}{n} - \frac{1}{\lambda_{k,4} - \lambda_{k,3}^2} \end{cases} \quad (19)$$

2.3 离散型随机变量的点估计法

对于发电机和输电线路等离散变量,可以通过离散变量连续化,使其转化为连续变量便于点估计法统一处理,原理如下。

离散变量可表示为:

$$X_k = \begin{cases} x_1 & P = p_1 \\ x_2 & P = p_2 \\ \vdots & \\ x_n & P = p_n \end{cases} \quad (20)$$

式中: p_n 为 $X_k = x_n$ 的概率。

定义 X_k 的概率密度函数为:

$$f(x) = \begin{cases} p_1 \delta(x - x_1) & x = x_1 \\ p_2 \delta(x - x_2) & x = x_2 \\ \vdots & \\ p_n \delta(x - x_n) & x = x_n \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (21)$$

式中: $\delta(\cdot)$ 为狄拉克函数。

通过上述方法将离散变量变换为连续变量,从而可以运用点估计方法进行统一处理。1.2 节中的 HVAC/DC 系统模型,所有离散状态元件均为 0-1 变量,以下仅须计算两状态离散变量连续化后对应的特征状态和权重。

若 x_k 为 0-1 变量,以元件运行容量与额定容量的比值来定义的元件状态,如图 4 所示。

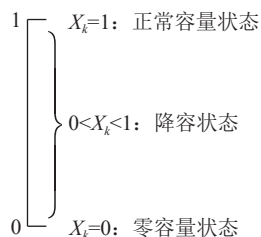


图 4 0-1 状态变量定义扩展

Fig.4 Definition expansion of 0-1 state variable

元件正常状态为 1,故障状态为 0,介于 0~1 之间的状态称为降容运行状态,发电机的降容状态可通过减小发电机最大输出功率表示,输电线路和 VSC 换流站的降容状态通过减小最大传输容量表示。根据式(21)可将变量连续化,再将连续化后的 0-1 变量代入点估计公式得其均值 μ_k 、估计点 $x_{k,1}$ 、 $x_{k,2}$ 、 $x_{k,3}$ 及其相应权重 $p_{k,1}$ 、 $p_{k,2}$ 、 $p_{k,3}$,分别如式(22)—式(24)所示^[30]。

$$\mu_k = E(X_k) = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx = p_k \quad (22)$$

$$\begin{cases} x_{k,1} = 1 \\ x_{k,2} = 0 \\ x_{k,3} = \mu_k \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} p_{k,1} = p_k \\ p_{k,2} = q_k \\ p_{k,3} = \frac{1}{n} - 1 \end{cases} \quad (24)$$

式中: p_k 为元件正常状态概率; q_k 为故障状态概率。

3 评估流程

文中所提的基于改进点估计法的 HVAC/DC 系统可靠性评估流程如图 5 所示。

4 算例

采用以 IEEE 14 交流系统为基础改造的 HVAC/DC 测试系统对所提方法进行验证分析,IEEE 14 原始交流系统参数参考文献[31]。将原系统中的线路 4—5 替换为直流输电线路,节点 4、5 处 VSC 换流站控制方式分别为 1.3 节中的③、②;去掉原系统节点 8 处的传统发电机;在节点 7、8 处分别接入风电场 WF2 和 WF1,且两风电场之间的风速条件相

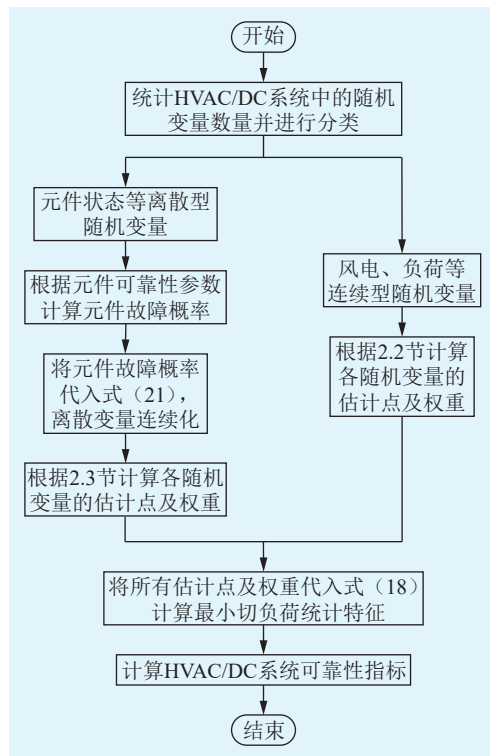


图 5 基于改进点估计法的 HVAC/DC 系统可靠性评估流程

Fig.5 Flow chart for reliability evaluation of HVAC/DC system based on improved point estimation method

互独立,并通过 VSC-HVDC 接入交流系统;电网侧与风电场侧 VSC 换流站控制方式分别为②、④。测试系统结构如图 6 所示, VSC-HVDC 系统参数参考文献[22],可靠性参数如表 1 所示^[32],风电场风速参数如表 2 所示。

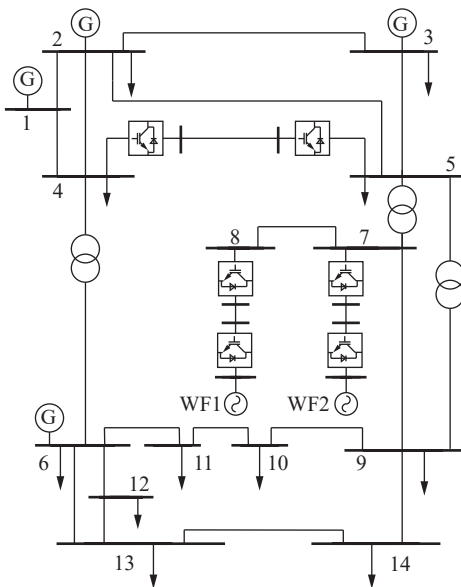


图 6 HVAC/DC 测试系统

Fig.6 HVAC/DC test system

4.1 点估计法与蒙特卡洛法结果对比

设置各个节点负荷服从以原给定有功负荷(简称 PD)的 2 倍(即 2PD)为均值、变异系数为 0.1 的

表 1 VSC-HVDC 系统可靠性参数

Table 1 Reliability parameters of VSC-HVDC system

元件	故障率/(次·a ⁻¹)	修复时间/h
断路器	0.001	40
变压器	0.05	1 000
相电抗器	0.05	300
交流滤波器	0.54	6
直流电缆	0.000 03	5
直流电容	0.001 5	10
换流器	0.5	4

表 2 风电场风速参数

Table 2 Wind speed parameters of wind farms

参数名称	WF1	WF2
形状参数	4.141 6	4.157 9
尺度参数	11.800 3	11.813 5

正态分布,各输电线路的最大传输容量为 100 MW。离散随机变量包括 19 条交流输电线路的状态变量、4 个常规发电机状态变量、构成 6 个 VSC 换流站的 18 个子系统状态变量以及构成 3 条直流输电线路的 6 个并联元件状态变量;连续随机变量则包括 2 个风电场出力以及各节点负荷。根据第 2 章的改进点估计法可对 HVAC/DC 系统进行可靠性评估,EENS 是较为常用的指标,因此,文中选择 EENS 作为主要研究指标。

同时,采用蒙特卡洛法对各随机变量进行采样,抽取 3 000 个样本并计算 EENS。蒙特卡洛法和改进点估计法需要进行的最小切负荷计算次数分别为 3 000 和 121,可知改进点估计法的切负荷计算量只有蒙特卡洛法的 4%,在计算效率方面具有非常强的优势。调整风电场的额定输出功率 P_R ,采用两种方法再次进行可靠性指标计算,并将调整前后的可靠性评估结果记入表 3。

表 3 不同风电场功率条件下 EENS 计算结果对比

Table 3 Comparison of EENS calculation results under different wind farm power conditions

P_R/MW	EENS/[(MW·h)·a ⁻¹]		误差/%
	蒙特卡洛法	改进点估计法	
30	232 929.89	227 166.91	-2.47
50	171 900.03	169 872.26	-1.18

根据表 3 计算结果可知,在该系统状态下,改进点估计法在减少计算量的同时能够保证计算结果的准确度,且在风电场额定输出功率 P_R 发生改变时,依然能保持一定准确度。

4.2 点估计法适用场景对比

为进一步论证点估计法的适用场景,调整输电

线路最大传输容量及负荷条件,并对两种方法的 EENS 计算结果进行对比。表 4 为风电场额定输出功率 P_R 为 50 MW、各节点负荷均值为 2PD 时不同线路传输容量下的 EENS 对比。表 5 为风电场额定输出功率 P_R 为 50 MW、传输容量为 200 MW 时不同节点负荷条件下的 EENS 对比。

表 4 不同线路容量下 EENS 计算结果对比

Table 4 Comparison of EENS calculation results under different line capacities

线路容量/ MW	EENS/[(MW·h)·a ⁻¹]		误差/%
	蒙特卡洛法	改进点估计法	
100	171 900.03	169 872.26	-1.18
150	118 813.63	116 508.49	-1.94
200	102 026.84	93 073.62	-8.78

表 5 不同负荷条件下 EENS 计算结果对比

Table 5 Comparison of EENS calculation results under different load conditions

负荷均值	EENS/[(MW·h)·a ⁻¹]		误差/%
	蒙特卡洛法	改进点估计法	
2PD	102 026.84	93 073.62	-8.78
1PD	7 936.56	0	-100

通过对表 4 分析可知,改变线路传输容量,使其由 100 MW 增加至 200 MW,改进点估计法仍然能够保持计算结果的准确度。

通过对表 5 分析可知,在 $P_R=50$ MW 的条件下,各节点负荷均值为 2PD 时,改进点估计法的计算结果较为准确。但需要注意的是,当负荷均值为 1PD 时,其相对误差达到-100%。这是由于当负荷整体处于较低水平时,绝大多数的系统抽样状态产生的切负荷数值也会相应降低,点估计法根据各个随机变量的概率分布构造的估计点所形成的系统特征状态切负荷量均为 0,从而引发估计盲区,这也是点估计法的局限性所在。

5 结论

文中提出一种基于改进点估计法的 HVAC/DC 系统可靠性评估方法。将 HVAC/DC 系统中直流子系统各个元件的随机运行状态表示为多个 0-1 变量,并用狄拉克函数将离散变量进行连续化,使其能与风光、负荷等连续变量统一采用点估计法进行处理。该评估方法应用点估计法描述了 HVAC/DC 系统元件的特点,并通过点估计法同时考虑系统中的离散变量和连续变量,实现了 HVAC/DC 系统的可靠性评估计算。通过算例分析,该方法在一定条件下能够大幅减小 HVAC/DC 系统的可靠性评

估计量,在计算效率方面具有非常强的优势。通过对比分析得出以下结论:

(1) 当 HVAC/DC 系统条件,如风电场额定输出功率 P_R 、输电线路容量以及负荷水平发生变化时,改进点估计法依然能够保证计算结果的准确度。

(2) 改进点估计法具有一定的适用场景。该方法不考虑随机变量之间的相关性,面向随机变量相互独立的 HVAC/DC 系统。通过算例分析可知,除了系统可靠性水平较高的运行场景外,点估计法对于常见的 HVDC/AC 系统可靠性指标估计具有良好的精度和效率表现。

(3) 文中将 HVAC/DC 系统中的 VSC 换流站以及直流输电线路划分为若干子系统。对于 VSC 换流站和直流输电线路,发生两极故障,即换流站与直流输电线路运行容量为 0% 的概率很小;大部分故障情况下都是发生单极故障,即运行容量为 50%。因此,将其按极划分为子系统后再由点估计法处理的方式是较为合理的。

实际中,电力系统设备繁多,运行环境复杂,且光伏、风电等新能源的间歇式发电模式对整个电网的冲击巨大,在这种情况下文中所提方法具有一定的适用性。除此之外,文中方法可以大幅降低可靠性评估的计算量,能够在随机、波动的新能源接入的情况下快速更新 HVAC/DC 系统的可靠性指标,以确保系统的安全稳定运行。

参考文献:

- [1] 徐晋,汪可友,李国杰. 电力电子设备及含电力电子设备电力系统实时仿真研究综述[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 3-17.
- XU Jin, WANG Keyou, LI Guojie. Review of real-time simulation of power electronic devices and power systems integrated with power electronic devices[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 3-17.
- [2] 涂思嘉,杨悦荣,林舜江,等. 考虑风电不确定性的交直流混联电网静态电压稳定优化控制方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(3): 94-104.
- TU Sijia, YANG Yuerong, LIN Shunjiang, et al. An optimal control method for static voltage stability of AC/DC hybrid power grid considering the uncertainty of wind power[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(3): 94-104.
- [3] 刘洪波,阎禹同,王曦,等. 多馈入交直流混联系统小干扰稳定研究综述[J]. 发电技术, 2023, 44(4): 565-575.
- LIU Hongbo, YAN Yutong, WANG Xi, et al. A review of small signal stability studies of multi-infeed AC-DC hybrid system[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(4): 565-575.
- [4] 王增平,林一峰,王彤,等. 电力系统继电保护与安全控制面临的挑战与应对措施[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 10-20.
- WANG Zengping, LIN Yifeng, WANG Tong, et al. Challenges and countermeasures to power system relay protection and safety control[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 10-20.
- [5] 齐金山,姚良忠,廖思阳,等. 高比例新能源电力系统静态电压稳定裕度在线概率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 47-57.
- QI Jinshan, YAO Liangzhong, LIAO Siyang, et al. Online probabilistic assessment of static voltage stability margin for power systems with a high proportion of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 47-57.
- [6] GUO L B, DING Y, YE C J. Operational reliability evaluation of an MTDC-based hybrid AC-DC power system considering conditional-dependent faults[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(4): 5544-5555.
- [7] 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.
- [8] HE X R, DING T, SUN Y G, et al. Interval reliability evaluation of hybrid AC/DC grids with integrated renewable energy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(5): 4501-4514.
- [9] LI Y, YUAN S, LIU W M, et al. A fast method for reliability evaluation of ultra high voltage AC/DC system based on hybrid simulation[J]. IEEE Access, 2018, 6: 19151-19160.
- [10] BO Y M, BAO M L, YANG B W, et al. A semi-Markov stochastic model for operational reliability assessment of hybrid AC and LCC-VSC-based DC system with remote wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(5): 6154-6167.
- [11] JIANG L Z, BIE Z H, LI G F, et al. Reliability evaluation of AC-DC hybrid grid based on state enumeration method[C]// 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP). Xi'an, China. IEEE, 2019: 391-395.
- [12] WANG C, XIE H P, BIE Z H, et al. Reliability evaluation of AC/DC hybrid power grid considering transient security constraints[C]// 2017 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE). Xi'an, China. IEEE, 2017: 1237-1242.
- [13] 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.
- [14] 汪隆君, 王钢, 李博. 交直流混联输电系统充裕度评估的最优负荷削减模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(7): 7-12.
WANG Longjun, WANG Gang, LI Bo. An optimal load shedding model for AC/DC hybrid transmission system adequacy assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(7): 7-12.
- [15] 丁明, 李小燕, 毕锐, 等. 含 VSC-HVDC 的交直流混合输电系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 53-58.
DING Ming, LI Xiaoyan, BI Rui, et al. Reliability assessment of hybrid AC/DC power system containing VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 53-58.
- [16] 李凌飞, 孙悦, 黄莹, 等. 考虑恶劣天气影响的海上风电场及柔性直流并网系统可靠性评估[J]. 南方电网技术, 2020, 14(12): 32-42.
LI Lingfei, SUN Yue, HUANG Ying, et al. Reliability evaluation of offshore wind farm and VSC-HVDC integrated system considering the influence of extreme weather[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(12): 32-42.
- [17] 潘伟, 刘文颖, 杨以涵. 概率最优潮流的点估计算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 28-33.
PAN Wei, LIU Wenying, YANG Yihan. Point estimate method for probabilistically optimal power flow computation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 28-33.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 包道日娜, 高帆, 王鹏, 等. 基于 Copula 函数的叶片载荷相关性研究及预测分析[J]. 太阳能学报, 2023, 44(12): 323-329.
BAO Daorina, GAO Fan, WANG Peng, et al. Research and forecasting analysis of blade load correlation based on Copula function[J]. Acta Energetica Sinica, 2023, 44(12): 323-329.
- [21] 甄志龙, 张居晓. 基于统计极差和变异系数的特征抽取研究[J]. 统计与决策, 2022, 38(23): 43-47.
ZHEN Zhilong, ZHANG Juxiao. Research on feature extraction based on statistical range and coefficient of variation[J]. Statistics & Decision, 2022, 38(23): 43-47.
- [22] RENEDO J, IBRAHIM A A, KAZEMTABRIZI B, et al. A simplified algorithm to solve optimal power flows in hybrid VSC-based AC/DC systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 110: 781-794.
- [23] 都嘉慧, 王长江, 李凌, 等. 计及换流器损耗的风电经柔直并网系统的随机最优潮流模型[J]. 中国电力, 2020, 53(5): 77-88.
DU Jiahui, WANG Changjiang, LI Ling, et al. Stochastic optimal power flow of wind turbine through flexible grid connected system considering converter loss[J]. Electric Power, 2020, 53(5): 77-88.
- [24] 赵真, 袁旭峰, 徐玉韬, 等. 一种改进三点估计法的概率潮流计算方法[J]. 南方电网技术, 2020, 14(11): 43-48.
ZHAO Zhen, YUAN Xufeng, XU Yutao, et al. An improved three-point estimate method for probability load flow calculation[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(11): 43-48.
- [25] 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.
- [26] 徐永海, 薛超凡, 陶顺, 等. 电力系统谐波潮流计算方法综述[J]. 电测与仪表, 2023, 60(12): 1-10.
XU Yonghai, XUE Chaofan, TAO Shun, et al. Review on harmonic power flow calculation method for power system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(12): 1-10.
- [27] 赵真, 袁旭峰, 艾小清, 等. 柔性互联配电网概率潮流算法研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(12): 90-95.
ZHAO Zhen, YUAN Xufeng, AI Xiaoqing, et al. Research on probabilistic load flow algorithm for flexible interconnected distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(12): 90-95.
- [28] 刘自发, 李颖雨, 于普洋. 一种基于蒙特卡洛方法的配电网概率可靠性快速计算方法[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(2): 9-19.
LIU Zifa, LI Jieyu, YU Puyang. A fast calculation method for probabilistic reliability of distribution network based on Monte Carlo method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 9-19.
- [29] 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. Operational reliability evaluation for power systems considering load redistribution attack[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8): 160-168.
- [30] 丘文千. 基于点估计法的电力系统可靠性评估方法研究[J]. 浙江电力, 2013, 32(8): 1-8.
QIU Wenqian. Research on power system reliability evaluation based on point estimation method[J]. Zhejiang Electric Power, 2013, 32(8): 1-8.
- [31] SRIKANTH P, RAJENDRA O, YESURAJ A, et al. Load flow

analysis of ieee14 bus system using MATLAB[J]. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 2013, 2(5): 149-155.

- [32] 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.

作者简介:



赵佳琪

赵佳琪(1999), 女, 硕士, 研究方向为交直流输电系统可靠性评估(E-mail: S20213081499@cau.edu.cn);

冯宁(2002), 男, 硕士在读, 研究方向为交直流系统谐波谐振风险分析;

王越(1982), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统可靠性与风险运行决策、电力系统运行备用规划以及小概率高危事件评估。

HVAC/DC system reliability evaluation based on improvement point estimation method

ZHAO Jiaqi, FENG Ning, WANG Yue

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The high voltage alternating current/direct current (HVAC/DC) system has a complex structure and a wide variety of components, so the reliability assessment using traditional methods bears huge computational burden. To improve the efficiency of HVAC/DC system reliability assessment, a HVAC/DC system reliability evaluation method based on an improved point estimation method is proposed in this paper. The proposed method analyzes the structure of various components of a typical HVAC/DC system and leverages the Dirac function to smooth the involved discrete random variables, so that the discrete component status can be generally tackled in common with the load, wind power and other continuous random variables using the point estimation method. On top of that, a non-linear program of minimum load shedding is embedded into the point estimation method to efficiently summarize kinds of reliability indices via finite-time optimal power flow calculation. Finally, a modified HVAC/DC test system based on the IEEE 14 system is utilized to demonstrate the usability and limitations of the proposed method. The results show that the proposed method can effectively reduce the calculation amount of HVAC/DC system reliability evaluation under certain conditions, and has good accuracy and efficiency performance.

Keywords: high voltage alternating current/direct current (HVAC/DC) system; voltage source converter reliability model; wind power integration; reliability evaluation; point estimation method; Dirac function

(编辑 陆海霞)