第 50 卷 第 11 期：4923-4932 高电压技术 Vol.50, No.11: 4923-4932
2024 年 11 月 30 日 High Voltage Engineering November 30, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230388

适用于输变电联合系统的改进 CESMC 可靠性评估方法

李 晨[1]，唐爱红[1]，张侃君[2]，杨惠源[1]，周虎兵[2]，滕 捷[2]
（1. 武汉理工大学自动化学院，武汉 430070；2. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院，武汉 430077）

摘 要：传统的序贯交叉熵(cross-entropy sequential Monte Carlo, CESMC)方法无法对包含多状态变电站等效元件模型的输电系统进行可靠性评估。为此，首先对变电站等效状态数目进行分析，并基于马尔可夫与交叉熵重要性抽样理论推导了变电站等效多状态元件的最优可靠性参数表达式以及参数优化的迭代计算式，提出了一种适用于输变电联合系统的改进 CESMC 可靠性评估方法，实现了对传统 CESMC 可靠性评估方法适用范围的扩展，解决了序贯交叉熵无法应用于多状态系统可靠性评估的难题。结合改进 CESMC 方法，实现包含变电站等效元件的输电系统可靠性评估加速，进一步构建了输变电联合系统可靠性评估模型。通过对 IEEE-RTS79 测试算例进行可靠性评估，验证了该方法的有效性，仿真结果表明，该方法可以在保证计算精度的前提下，较大地提升输变电联合系统可靠性评估的效率，具有一定的实用价值。

关键词：可靠性评估；输电系统；变电站；蒙特卡洛；马尔可夫；重要性抽样；交叉熵

Improved CESMC Based Reliability Assessment Method for Composite Transmission and Substation System

LI Chen[1], TANG Aihong[1], ZHANG Kanjun[2], YANG Huiyuan[1], ZHOU Hubing[2], TENG Jie[2]
(1. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
2. Electric Power Research Institute, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China)

Abstract：It is unable to analyze the reliability of the composite transmission and substation system which incorporates the equivalent multi-state substation components by using traditional cross-entropy sequential Monte Carlo (CESMC) method. Therefore, this paper first analyzes the number of equivalent states of the substation, and derives the optimal reliability parameter expression and parameter optimization iterative formula for the equivalent multi-state components of the substation based on Markov and cross-entropy importance sampling theory. A modified CESMC reliability assessment method suitable for the transmission and transformation joint system is proposed, which expands the scope of application of the traditional CESMC reliability assessment method and solves the problem that sequential cross-entropy can not be applied to multi-state system reliability assessment. Combined the improved CESMC method, the reliability assessment of the power transmission system containing equivalent components of the substation is accelerated, and a reliability assessment model for the transmission and transformation joint system is further constructed. Finally, as a case for testing the proposed model, the reliability of IEEE-RTS79 system is analyzed. The simulation results show the availability and the advantages of the proposed method when assessing the reliability of the composite system. Meanwhile, the influence of the substations on the reliability of the transmission system can also be found according to the results.

Key words：reliability assessment; transmission power system; substation; Monte Carlo; Markov; importance sampling; cross entropy

基金资助项目：湖北省重点研发计划(新型电力系统检修应急转供装置与智能决策平台研发及应用)(YFXM2022000313)；国网湖北省电力有限公司科技项目(含高占比随机新能源及电能替代的新型电力系统检修过渡风险评估及决策研究)(B31532210018)。
Project supported by Key R&D Program of Hubei Province (Development and Application of a New Emergency Transfer Device and Intelligent Decision Platform for Power System Maintenance) (YFXM2022000313), Science and Technology Projects of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd. (Research on Risk Assessment and Decision Making for the Maintenance Transition of New Power Systems with High Ratio Random New Energy and Electricity Substitution) (B31532210018).

0 引言

变电站承担着不同电压等级电网之间的电力变换[1-3]，其一次设备故障，如设备老化等[4]，可能会导致厂站部分供电中断，区域电网停电风险升高，从而对输电系统可靠性产生影响[5]。因此，在输电系统可靠性评估中充分考虑变电站设备故障的影响，对准确评估系统可靠性、保证其安全运行十分重要。

目前，已有学者在输变电系统可靠性评估中考虑了变电站设备故障的影响。文献[6]利用多种母线模型对变电站进行简化，实现了输、变系统的互联，进而对系统整体进行可靠性评估。文献[7]提出一种分层蒙特卡洛方法，预先利用蒙特卡洛抽样法分析变电站系统内设备故障的影响，随后将计算结果耦合至输电系统。上述方法在评估中，保留了变电站内原始设备参数，提高了计算结果的准确性，但是增加了单次计算的时间成本。当所考虑的变电站数目较多时，算法的收敛速度将受到严重的负面影响。因此，有学者提出基于变电站可靠性评估结果，直接将其等效为待评估系统内的一个元件，以提高计算速度[8-10]。如文献[8]与文献[9]分别以变电站等效多状态元件表示系统的所有运行情况，并利用状态枚举法完成了输变电系统的可靠性计算，提升了计算效率。然而，基于枚举法无法对变电站不同状态之间的转移过程加以描述。因此，文献[10]提出利用序贯蒙特卡洛模拟法(sequential Monte Carlo，SMC)实现元件状态的时序模拟，以还原变电站的运行特点。但是，采用 SMC 方法往往会面临收敛困难的问题[11-13]，需要进一步改进，以提高运算性能。

SMC 方法常用的加速措施包括抽样样本改进措施[14-16]以及方差削减加速措施[17-19]等。众多改进算法中，基于交叉重要抽样法原理的序贯交叉熵(cross-entropy sequential Monte Carlo, CESMC)方法被证明计算效率优良，时间成本低，是目前主流的输电系统可靠性评估方法[20-23]。然而，在传统 CESMC 方法中，所建立的可靠性参数修正公式等均只针对两状态元件，若在输电系统中引入包含多个状态的变电站元件，则 CESMC 将不再适用。

因此，为利用收敛性能良好的 CESMC 算法进行输变电系统可靠性计算，本文拟对传统 CESMC 方法加以改进，使其可以用于分析包含多状态变电站等效元件模型的输变电联合系统。首先，依据变电站系统运行特点，分析变电站等效元件状态数目 n；然后，基于马尔科夫理论与交叉熵重要抽样原理，推导适用于 n 状态元件的最优可靠性参数修正公式，进而得到改进的 CESMC 方法，并以改进 CESMC 方法为基础，构建输变电联合系统可靠性评估模型；最后，通过在 IEEE-RTS79 系统上的测试验证该方法的有效性与评估速率优越性，并定量分析考虑变电站可靠性对输电系统可靠性的影响。

1 改进 CESMC 可靠性评估方法

依据文献[19]，CESMC 可靠性评估共分为 2 个阶段：一个是用于寻找最优概率分布的交叉熵预抽样阶段；另一个则是基于最优概率分布的可靠性指标计算仿真阶段。

在预抽样阶段，对于仅由两状态元件组成的系统，由于每个元件的状态持续时间均服从参数为状态转移率 η_i 的指数分布，因此该阶段的目标为找到元件最优转移率 η_i^*。设系统概率分布密度函数中的变量参数为元件不可用率 u，其表达式为：

$$u=\lambda/(\lambda+\mu) \tag{1}$$

式中：λ 表示元件故障率；μ 表示元件修复率。

然而，当部分元件状态数目大于 2 时，式(1)将不再适用。同时，以式(1)与交叉熵重要抽样法为基础而得到的最优可靠性参数公式也同样不再适用。

因此，需要对传统 CESMC 方法中的元件状态数目进行扩展。首先，基于变电站等效原理，分析变电站等效元件的状态数目 n；随后，推导适用于 n 状态元件的最优可靠性参数公式，并将其补充至传统 CESMC 算法体系中，构成改进的 CESMC 方法。

1.1 变电站等效原理与等效元件状态数目分析

1.1.1 变电站等效模型

从输电系统层级来看，变电站内部的故障可能会导致某节点负荷或电源的连通中断，相当于影响输电系统中对应节点的运行情况。因此，以图 1 所示的等效过程为例，预先对变电站内各种故障运行情况进行分析。依据分析结果，可以将变电站系统的故障情况嵌入至母线元件可靠性模型中，进而与母线共同组成一个变电站等效元件。每次可靠性计算过程中，都将变电站作为输电系统的一个元件进行状态模拟。

图 1 中，①表示对节点所在厂站主接线拓扑进行具体的展开分析；②表示依据主接线分析结果，进行变电站系统的等效可靠性建模；③表示将等效

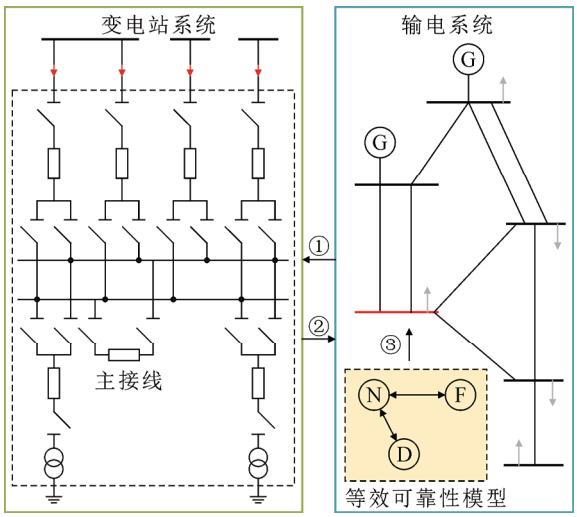


图 1　变电站等效示意图

Fig.1　Procedures of the equivalence of the substation

模型嵌入至原系统可靠性评估中。

1.1.2　变电站等效元件状态分析

变电站系统一般有多回出线，且一次主接线拓扑结构较为复杂，站内主要设备发生故障后，可能会出现多种系统故障状态。根据变电站运维特点，系统进入任意故障状态后后会立即进入检修状态直至故障恢复，即各种故障状态之间不存在状态转移过程。因此，可以采用图 2 所示的广义三状态模型等效任意变电站一次系统的运行状态。

图 2 中，λ_1、λ_2、μ_1以及μ_2分别表示 3 个状态之间转移的故障率与修复率，N 表示正常运行状态，F 表示完全中断状态，D 表示部分导通状态集合，其故障率为所有部分导通状态故障率之和。当元件进入状态 D 后，可以利用文献[24]所述的随机数区间抽样方式决定元件具体的故障模式。

1.2　改进 CESMC 中最优可靠性参数研究

基于马尔可夫理论[25-26]，可以得到图 2 所示三状态元件的一阶状态转移矩阵 $\boldsymbol{T}$ 为：

$$\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix}1-\lambda_1-\lambda_2 & \lambda_1 & \lambda_2\\ \mu_1 & 1-\mu_1 & 0\\ \mu_2 & 0 & 1-\mu_2\end{bmatrix} \tag{2}$$

依据马尔可夫极限分布原理[27]，元件处于 3 个稳态状态的概率向量 $\boldsymbol{\pi}=[P_{\mathrm{N}},P_{\mathrm{D}},P_{\mathrm{F}}]$ 满足：

$$\boldsymbol{\pi}=\boldsymbol{\pi}\boldsymbol{T} \tag{3}$$

3 个稳态状态概率之间同时满足：

$$P_{\mathrm{N}}+P_{\mathrm{D}}+P_{\mathrm{F}}=1 \tag{4}$$

此外，状态转移矩阵 $\boldsymbol{T}$ 的秩为 2，任取其中 2 行与式(3)、式(4)共同组成方程组(5)。

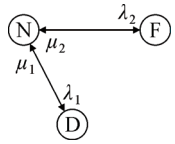


图 2　元件广义三状态模型

Fig.2　Generalized three-state model of the component

$$\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ \lambda_1 & -\mu_1 & 0\\ \lambda_2 & 0 & -\mu_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}P_{\mathrm{N}}\\ P_{\mathrm{D}}\\ P_{\mathrm{F}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1\\ 0\\ 0\end{bmatrix} \tag{5}$$

求解式(5)，可以得到元件分别处于 3 个状态的稳态概率表达式，分别如式(6)—式(8)所示。

$$P_{\mathrm{D}}=\frac{\lambda_1\mu_2(\mu_1+\lambda_2)}{(\mu_2\lambda_2+\mu_1\lambda_2+\mu_1\mu_2)(\lambda_1+\mu_1)} \tag{6}$$

$$P_{\mathrm{F}}=\frac{\mu_1\lambda_2}{\mu_2\lambda_2+\mu_1\lambda_2+\mu_1\mu_2} \tag{7}$$

$$P_{\mathrm{N}}=1-P_{\mathrm{D}}-P_{\mathrm{F}} \tag{8}$$

上述稳态概率 P_{N}、P_{D}、P_{F} 为三状态模型的 3 个可靠性参数，由于 P_{N} 可由另外 2 个状态表示，因此，每个三状态模型对应于 2 个独立可靠性参数，分别将 P_{D} 与 P_{F} 记作 u_{D} 和 u_{F}。

原始输发电系统由元件两状态模型组成，其可靠性参数向量为 $\boldsymbol{\alpha}=[u_1,\cdots,u_{\mathrm{M}}]^{\mathrm{T}}$，假设系统考虑 L 个变电站三状态模型，则此时系统的可靠性参数向量为 $\boldsymbol{\beta}=[\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}},u_{\mathrm{D1}},u_{\mathrm{F1}},\cdots,u_{\mathrm{DL}},u_{\mathrm{FL}}]^{\mathrm{T}}$。

在传统 CESMC 中，原始状态变量 x_i 用于表示该元件是否进入故障状态。而在三状态 CESMC 中，额外设置类型变量 y_i 用于表示三状态元件的故障类型，该变量取值为 1 表示进入故障状态 D，取值为 0 表示进入故障状态 F。

此时，系统的原始概率密度分布如式(9)所示。

$$\begin{aligned}f(x_i,y_i;\beta)=&\prod_{j=1}^{M}(1-u_j)^{x_{ij}}u_j^{(1-x_{ij})}\cdot\\ &\prod_{k=M+1}^{M+L}(1-u_{Dk}-u_{Fk})^{x_{ij}}u_{Fk}^{(1-x_{ij})(1-y_{ik})}u_{Dk}^{(1-x_{ij})y_{ik}}\end{aligned} \tag{9}$$

式中：M 表示两状态元件数目。依据文献[15]，交叉熵重要抽样法的寻优目标为寻找满足式(10)的最优概率分布。

$$\frac{1}{N_{\mathrm{s}}}\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{s}}}F(x_i,y_i)W(x_i,y_i;\beta,\gamma)\frac{\partial\ln g(x_i,y_i;\gamma)}{\partial\gamma}=0 \tag{10}$$

式中：N_{s} 表示系统状态总数；g 为重要抽样概率密度分布；γ 为最优可靠性参数；W 为似然比，用于修正基于最优参数所得可靠性指标与原始指标之间的偏差。

根据文献[18]，当用于修正负荷损失时间以及由负荷波动而引起的失负荷频次时，W 表达式如式(11)所示；而当用于修正由元件状态转移引起的失负荷频次时，其表达式如式(12)所示。

$$W(x_i)=P(x_i)/P^*(x_i) \tag{11}$$

$$W(x_i)=\eta_i P(x_i)/(\eta^*_i P^*(x_i)) \tag{12}$$

式中：$P(x_i)$为原始可靠性参数下系统概率；$P^*(x_i)$表示最优可靠性参数下系统概率。用ν表示交叉熵优化后参数，则式(9)所对应的重要抽样概率密度分布函数为：

$$g(x_i,y_i;\gamma)=\prod_{j=1}^{M}(1-\nu_j)^{x_{ij}}\nu_j^{(1-x_{ij})}\cdot \prod_{k=M+1}^{M+L}(1-\nu_{\mathrm{D}k}-\nu_{\mathrm{F}k})^{x_{ij}}\nu_{\mathrm{F}k}^{(1-x_{ij})(1-y_{ik})}\nu_{\mathrm{D}k}^{(1-x_{ij})y_{ik}} \tag{13}$$

为求取式(10)，令 $L=\ln g(x_i,y_i;\gamma)$，分别令式(13)对两状态模型的可靠性参数ν_j和三状态模型可靠性参数$\nu_{\mathrm{D}k}$和$\nu_{\mathrm{F}k}$求偏导数，可以得到式(14)—式(16)。

$$\partial L/\partial\nu_j=\left(1-x_{ij}(1-\nu_j)\right)/\nu_j \tag{14}$$

$$\frac{\partial L}{\partial\nu_{\mathrm{D}k}}=\frac{-x_{ik}}{1-\nu_{\mathrm{D}k}-\nu_{\mathrm{F}k}}+\frac{(1-x_{ik})y_{ik}}{\nu_{\mathrm{D}k}} \tag{15}$$

$$\frac{\partial L}{\partial\nu_{\mathrm{F}k}}=\frac{-x_{ik}}{1-\nu_{\mathrm{D}k}-\nu_{\mathrm{F}k}}+\frac{(1-x_{ik})(1-y_{ik})}{\nu_{\mathrm{F}k}} \tag{16}$$

将式(14)—式(16)代入式(10)可得式(17)—式(19)。

$$\nu_j^*=1-\frac{\sum_{i=1}^{N}H(x_i)W(x_i,y_i;\beta,\gamma)x_{ij}}{\sum_{i=1}^{N}H(x_i)W(x_i,y_i;\beta,\gamma)} \tag{17}$$

$$\frac{\sum_{i=1}^{N_S}H(x_i)W(x_i,y_i;\beta,\gamma)\left(\frac{-x_{ik}}{1-\nu_{\mathrm{D}k}-\nu_{\mathrm{F}k}}+\frac{(1-x_{ik})y_{ik}}{\nu_{\mathrm{D}k}}\right)}{N_S}=0 \tag{18}$$

$$\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}H(x_i)W(x_i,y_i;\beta,\gamma)\left(\frac{-x_{ik}}{1-\nu_{\mathrm{D}k}-\nu_{\mathrm{F}k}}+\frac{(1-x_{ik})(1-y_{ik})}{\nu_{\mathrm{F}k}}\right)=0 \tag{19}$$

式中：N 表示仿真次数；$H(x_i)$为指示函数，当系统发生负荷削减时，该函数值为1，否则为0。联立式(18)和式(19)可以得到式(20)与式(21)。

$$\nu_{\mathrm{D}k}^*=\frac{\sum_{i=1}^{N}H(x_i)W(x_i,y_i;\beta,\gamma)(1-x_{ik})y_{ik}}{\sum_{i=1}^{N}H(x_i)W(x_i,y_i;\beta,\gamma)} \tag{20}$$

$$\nu_{\mathrm{F}k}^*=\frac{\sum_{i=1}^{N}H(x_i)W(x_i,y_i;\beta,\gamma)(1-x_{ik})(1-y_{ik})}{\sum_{i=1}^{N}H(x_i)W(x_i,y_i;\beta,\gamma)} \tag{21}$$

对于式(20)而言，当最优参数迭代次数为1时，似然比值为1，此时，式(20)可以写为：

$$\nu_{\mathrm{D}k}^*=\frac{\sum_{i=1}^{N}H(x_i)(1-x_{ik})y_{ik}}{\sum_{i=1}^{N}H(x_i)} \tag{22}$$

当抽样次数较大时，依据大数定律，可靠性指标失负荷概率(loss of load probability，LOLP)可以表示为：

$$P_{\mathrm{LOL}}=\left(\sum_{i=1}^{N}H(x_i)\right)/N \tag{23}$$

同时，定义P_{LOLD}表示元件处于状态D下的LOLP指标，该指标的计算式为：

$$P_{\mathrm{LOLD}}=\frac{\left(\sum_{i=1}^{N}H(x_i)(1-x_{ik})y_{ik}\right)/N}{u_{\mathrm{D}k}} \tag{24}$$

将式(23)、式(24)代入式(22)可以得到：

$$\nu_{\mathrm{D}k}^*=\frac{P_{\mathrm{LOLD}}u_{\mathrm{D}k}}{P_{\mathrm{LOL}}} \tag{25}$$

同理，可以推导得到$\nu_{\mathrm{F}k}^*$的表达式：

$$\nu_{\mathrm{F}k}^*=\frac{P_{\mathrm{LOLF}}u_{\mathrm{F}k}}{P_{\mathrm{LOL}}} \tag{26}$$

式中：P_{LOLF}表示元件处于状态F下的LOLP指标。对于序贯蒙特卡洛而言，可靠性指标的计算可以用仿真年内故障时间与总时间T的比值表示[14,24]，具体如下：

$$P_{\mathrm{LOL}}=\left(\sum_{i=1}^{N}H(x_i)D(x_i)\right)/T \tag{27}$$

$$P_{\mathrm{LOLD}}=\left(\sum_{i=1}^{N}H(x_i)D(x_i)(1-x_{ij})y_{ij}\right)/(Tu_{\mathrm{D}k}) \tag{28}$$

$$P_{\mathrm{LOLF}}=\frac{\sum_{i=1}^{N}H(x_i)D(x_i)(1-x_{ij})(1-y_{ij})}{Tu_{\mathrm{F}k}} \tag{29}$$

将式(28)与式(29)代入式(25)和式(26)并再次应用重要抽样法，可以得到$\nu_{\mathrm{D}k}^*$与$\nu_{\mathrm{F}k}^*$在序贯蒙特卡洛中的表达式：

$$\nu_{\mathrm{D}k}^*=\frac{\sum_{i=1}^{N}H(x_i)D(x_i)W(x_i,y_i;\beta,\gamma)(1-x_{ik})y_{ik}}{\sum_{i=1}^{N}H(x_i)D(x_i)W(x_i,y_i;\beta,\gamma)} \tag{30}$$

$$\nu_{\mathrm{F}k}^*=\frac{\sum_{i=1}^{N}H(x_i)D(x_i)W(x_i,y_i;\beta,\gamma)(1-x_{ik})(1-y_{ik})}{\sum_{i=1}^{N}H(x_i)D(x_i)W(x_i,y_i;\beta,\gamma)} \tag{31}$$

而对于两状态元件的最优可靠性参数ν_j^*，依据文献[18]，其表达式为：

$$v_j^*=\frac{\sum_{i=1}^{N}H(x_i)D(x_i)W(x_i,y_i;\beta,\gamma)(1-x_{ij})}{\sum_{i=1}^{N}H(x_i)D(x_i)W(x_i,y_i;\beta,\gamma)} \tag{32}$$

至此，式(30)—式(32)表示 2 种元件的最优可靠性参数表达式，其中式(32)表示一般两状态元件的最优不可用率，式(30)和式(31)表示三状态元件分别处于 2 种不同故障状态的最优不可用率。

给定最优可靠性参数后，利用式(6)和式(7)可进一步确定三状态元件的转移率大小，而利用式(33)可确定两状态元件的转移率大小。

$$\lambda_i^*=u_i^*\mu_i/(1-\mu_i) \tag{33}$$

此时，由于方程未知数的个数多于方程个数，显然会存在无穷多种组合方案。考虑到由正常状态向任何故障状态转移都会增大系统发生故障的概率，本文假设两状态模型和三状态模型的修复率均保持不变，只修正故障率。

将上述三状态元件最优可靠性参数公式补充至传统 CESMC 方法中，即可得到适用于输变电系统的改进 CESMC 评估方法。

2　基于改进 CESMC 方法的输变电联合系统整体可靠性评估模型

基于改进 CESMC 方法的输变电联合系统整体可靠性评估分为 3 个阶段：变电站等效建模阶段、改进 CESMC 预抽样阶段以及改进 CESMC 仿真阶段。

2.1　变电站等效建模阶段

首先，依据变电站拓扑情况及保护配置，分析变电站内各元件故障情况下的关联后果[28]，分别形成每个元件发生扩大型故障和拒动故障的关联动作元件集合矩阵 $\boldsymbol{C}_{\mathrm{b}}$ 和 $\boldsymbol{B}_{\mathrm{h}}$，2 个矩阵分别记录元件扩大型故障和拒动故障所引起的关联停运元件。

然后，设置可靠性评估参数，包括最大仿真年限 N_{ys}、收敛系数 β_{s}、当前迭代次数 k 以及元件可靠性参数，并基于 SMC 抽样原理，形成变电站各元件状态序列以及状态持续时间。若当前状态产生自元件的扩大型故障或拒动故障，则利用矩阵 $\boldsymbol{C}_{\mathrm{b}}$ 和 $\boldsymbol{B}_{\mathrm{h}}$ 分析其故障扩大范围，并记录倒闸操作时间，对系统持续时间以及其他元件状态进行修正。

依据元件状态序列，组成系统状态并计算每个系统状态的可达矩阵，分析变电站内供电通路，判断当前系统处于 N、D、F 中哪个状态，并累计状态转移次数与持续时间。

根据上述计算结果，累计风险指标，并根据式(34)判断变电站可靠性评估阶段是否收敛[19]。若收敛，则得到相应指标、状态转移频次以及状态持续时间；否则继续进行状态抽样过程，直至算法收敛。

$$c_{\mathrm{on}k}<\beta_{\mathrm{s}}\ \text{或}\ k>N_{\mathrm{ys}} \tag{34}$$

式中：$c_{\mathrm{on}k}$ 表示第 k 次迭代时收敛度，其表达式为：

$$c_{\mathrm{on}k}=\sqrt{v_{\mathrm{ar}}(E_k)}\big/E_k \tag{35}$$

式中：E_k 表示第 k 次迭代时得到的电量不足期望值(expected energy not served, EENS)；$v_{\mathrm{ar}}(\cdot)$ 表示求方差。

最后，利用得到的可靠性指标以及状态转移率与持续时间，形成变电站等效元件可靠性模型。

2.2　改进 CESMC 预抽样阶段

在该阶段需要依据系统的原始参数，利用前文所述最优参数修正方法，对可靠性参数进行修正。

首先，设置预抽样参数，包括最大抽样年限 N_{yce}、平滑系数 α、收敛系数 ρ、当前迭代次数 k_1 以及元件可靠性参数，并基于原始可靠性参数，结合序贯蒙特卡洛中的状态转移抽样原理，形成单次仿真年限里的系统状态序列。

然后，对每个系统状态进行分析。判断每个状态下是否发生变电站元件故障或其他元件故障所导致的功率不平衡情况。若发生变电站故障，则还需要再次产生随机数识别其故障类型，依据类型分别统计负荷削减情况；若系统发生任意故障情况，则依据故障类型，利用式(11)或式(12)计算似然比，并统计负荷削减量和削减时间。直至全部系统状态分析完毕，分别利用式(30)、式(31)以及式(32)计算变电站元件和系统其他元件的最优可靠性参数。并分别依据式(6)、式(7)以及式(33)得到元件故障率。

最后，基于系统 LOLP 的结果，依据式(36)判断是否满足收敛条件。

$$P_{\mathrm{LOL}}/k_1<\rho\ \text{或}\ k_1>N_{\mathrm{yce}} \tag{36}$$

若收敛，则得到最优可靠性参数和故障率结果；否则重复上述计算过程直至收敛。

2.3　改进 CESMC 仿真阶段

在该阶段将基于预抽样阶段得到的最优可靠性参数，再次对系统进行可靠性评估仿真，计算得到可靠性指标。

首先，设置仿真参数，包括最大仿真年限 N_{ys} 以及收敛系数 β、当前迭代次数 k_2 以及元件可靠性参数，并基于预抽样可靠性参数对系统状态进行模型分析。对于每个状态下的故障计算结果，需要依据

似然比进行修正。

然后，统计系统的可靠性指标并判断是否满足式(37)所示收敛条件，若满足则得到可靠性指标，否则重复仿真计算。

$$c_{\mathrm{on}k2} < \beta \text{ 或 } k_2 > N_{\mathrm{ys}} \tag{37}$$

式中：$c_{\mathrm{on}k2}$ 表示第 k_2 次迭代时收敛度。$c_{\mathrm{on}k2}$ 的表达式为：

$$c_{\mathrm{on}k2} = \sqrt{v_{\mathrm{ar}}(E_{k2})}\big/E_{k2} \tag{38}$$

式中：E_{k2} 表示第 k_2 次迭代时得到的 EENS 值。

综上所述，输变电联合系统整体可靠性评估流程如图 3 所示。

3 算例分析

为验证本文所述方法的有效性，以图 4 所示的 IEEE-RTS79 系统为例进行可靠性计算。RTS79 系统的发电机与输电线路参数、小时负荷水平以及元件可靠性参数详见文献[29-31]。以系统节点 19 与节点 20 的变电站为研究对象，展开其变电站主接线并进行变电站可靠性模型等效处理。

3.1 变电站等效建模

假设位于节点 19 与节点 20 的变电站主接线均为双母线接线形式，站内各有 2 台主变，节点 19 处变电站 A 的一次主接线图与节点 20 处变电站 B 的一次主接线图如图 5 所示。

通过分析变电站内的保护配置情况，可以得到 2 座变电站内各个元件发生扩大型故障的关联元件矩阵 $\boldsymbol{C}_{\mathrm{b}}$ 的和拒动故障下的上级断路器矩阵 $\boldsymbol{B}_{\mathrm{h}}$，2 个矩阵反映了不同元件的故障连锁后果，以变电站 A 为例，其矩阵分析结果如表 1 所示。

然后，利用 SMC 方法对变电站 A 系统可靠性进行评估，评估时依据表 1 可以对变电站 A 内元件发生主动失效时的系统状态进行修正。

设置变电站可靠性评估的参数如下：最大仿真次数 N_{ys}=1 000，收敛系数 β_{s} 为 5%[18,20]。断路器、母线以及变压器的可靠性参数参考自文献[25]，为贴近 RTS79 系统的可靠性水平，所有元件的故障率降低至文献所记载数值的 10%，如表 2 所示。

基于表 2 参数对变电站 A 进行可靠性分析，进而可以得到变电站等效元件处于 3 种状态的平均时间，以及各个状态之间的故障率以及修复时间，如表 3 所示。

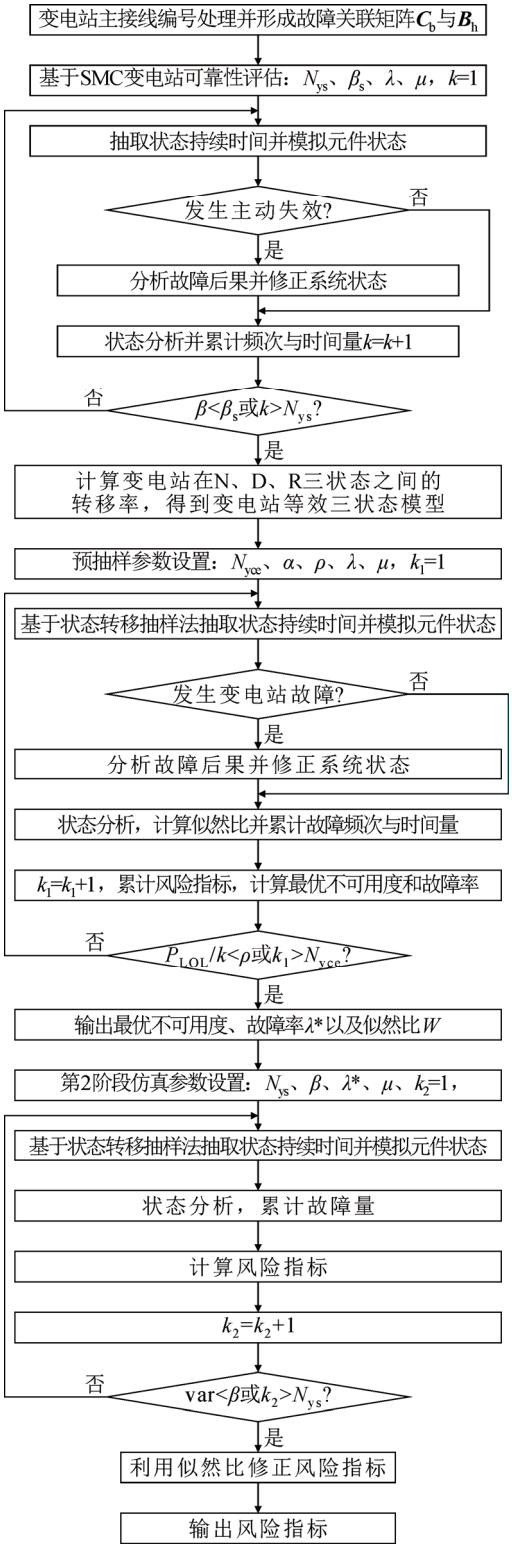


图 3 输变电联合系统可靠性评估流程

Fig.3 Procedures of reliability evaluation for integrated transmission and substation system

同理，基于同样元件可靠性参数和评估参数设置，可以计算得到变电站 B 等效元件的可靠性参数如表 4 所示。

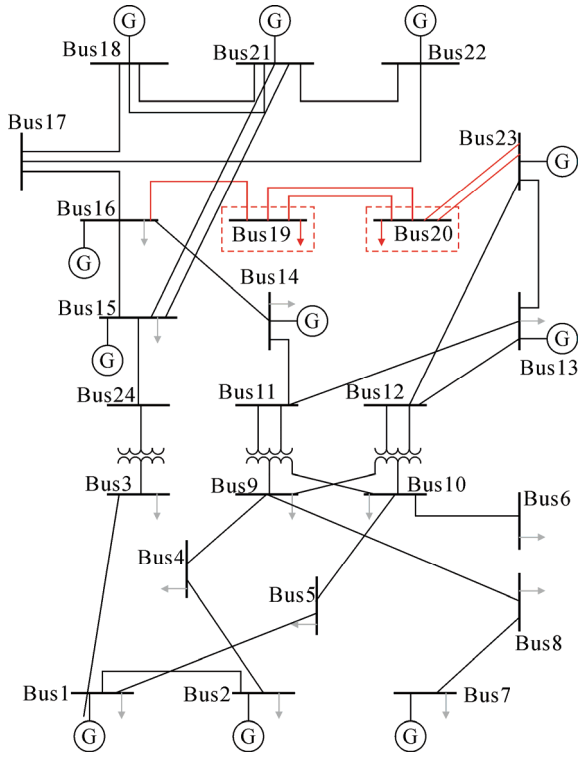


图 4　IEEE RTS79 系统拓扑图

Fig.4　Topology of the IEEE-RTS79 system

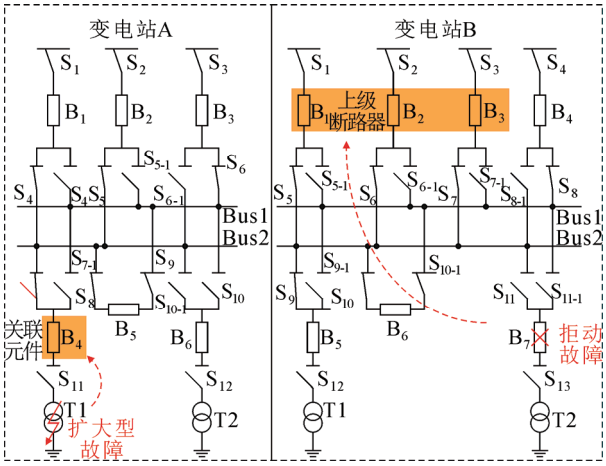


图 5　变电站主接线图

Fig.5　Main wires of substations

对比表 3 和表 4 中 2 个变电站系统等效元件的参数可以看出，变电站处于不完全故障状态的概率最高，处于完全故障状态的概率最低。主要原因在于变电站内母线与变压器的故障率均相对较高，任意一个变压器停电或母线停电都可能造成单条通路不畅，因此整体看来系统处于不完全故障状态的几率会相对较高。

3.2　基于改进 CESMC 方法的输变电联合系统可靠性评估分析

本文首先基于 IEEE-RTS79 系统设计 4 种评估方案，以用于后续的方法有效性检验，4 种系统方案分别为：1）方案 1，不考虑变电站可靠性模型；2）方案 2，仅考虑节点 19 的变电站可靠性模型；3）方案 3，仅考虑节点 20 的变电站可靠性模型；4）方案 4：同时考虑节点 19 与节点 20 的变电站可靠

表 1　变电站 A 的关联断路器矩阵 $\boldsymbol{C}_{\mathrm{b}}$ 与上级断路器 $\boldsymbol{B}_{\mathrm{h}}$

Table 1　Related circuit breaker matrix $\boldsymbol{C}_{\mathrm{b}}$ and $\boldsymbol{B}_{\mathrm{h}}$ of substation A

元件类型	元件名称	关联断路器/上级断路器
母线	Bus1	B3、B5 和 B6
	Bus2	B1、B2、B5 和 B4
变压器	T1	B4
	T2	B6
断路器	B1	B2、B4 和 B5
	B2	B1、B4 和 B5
	B3	B5 和 B6
	B4	B1、B2 和 B5
	B5	B1、B2 和 B4
	B6	B3 和 B5

表 2　变电站元件可靠性参数

Table 2　Reliability parameters of substation

元件类型	主动失效率/(次·a^{-1})	非主动失效率/(次·a^{-1})	故障修复率/(次·a^{-1})
母线	0.017 52		40
变压器	0.003 52	0.000 33	500
断路器	0.001 63	0.000 12	100

表 3　变电站 A 等效三状态可靠性参数

Table 3　Reliability parameters of three-state model of the substation A

参数	条件	数值
故障率/(次·a^{-1})	N→D	0.018 9
	N→F	0.035 9
修复时间/h	D→N	8 569
	F→N	131
稳态状态概率	P_{D}	0.048 9
	P_{F}	1.79×10^{-5}

表 4　负荷 B 等效三状态可靠性参数

Table 4　Reliability parameters of three-state model of the substation B

参数	条件	数值
故障率/(次·a^{-1})	N→D	0.052 6
	N→F	0.001 2
修复时间/h	D→N	9 846
	F→N	213
稳态状态概率	P_{D}	0.020 8
	P_{F}	8.38×10^{-4}

性模型。

3.2.1 改进 CESMC 方法的有效性与优越性检验

首先，为校验本文所提出的改进 CESMC 方法在评估输、变电联合系统可靠性时的有效性与优越性，本文分别应用基于 SMC 的分层评估方法[6](方法 1)、基于 SMC 的等效评估方法[9](方法 2)以及基于改进 CESMC 的整体评估方法(方法 3)对方案 2 所述算例进行评估。方法 3 预抽样阶段的收敛系数 ρ=0.01，最大仿真年限 N_{yce}=1 000。方法 1、方法 2 以及方法 3 仿真阶段的收敛系数均设置为 0.05，且最大仿真年限为 10 000[17-18,20]。

可靠性指标计算结果如表 5 所示。3 种算法的可靠性收敛过程如图 6 所示。

首先，从表 5 记载的可靠性数值结果来看，3 种方法得到的指标结果差异性较小。以 LOLP 为例，相对偏差不超过 1.8%，证明采用改进 CESMC 方法并不会对可靠性指标的准确性产生较大的影响，也进一步说明改进 CESMC 在评估输变电系统可靠性方面的有效性。此外，可以看出由三状态 CESMC 得到的 LOLP 与 EENS 结果往往要比 SMC 计算结果略大，而 LOLF 结果则要稍小，产生上述不同方向误差的原因在于 3 个指标所涉及的似然比公式差异。

与此同时，从图 6 可以看出，3 种方法中，方法 1 的收敛迭代次数最大，约为方法 2 的 3 倍，为方法 1 的 18 倍，证明采用等效方法的收敛性要优于分层评估法。此外，对比方法 1 与方法 2 的收敛性可以看出，采用改进 CESMC 方法对减少可靠性迭代次数具有明显的改进效果。结合表 5 所示的计算时长可以得知，方法 3 的计算时间最短，进一步验证了方法 3 在评估输变电系统可靠性的计算效率方面的优越性。

值得注意的是，依据仿真结果，可以求得方法 1 的每代平均计算时长约为 50 s，方法 2 约为 40 s，方法 3 约为 92 s。方案 3 时间最长的原因在于通过修正可靠性参数，每次迭代时计算的系统状态数目相较于方法 2 明显增多。同时，比较方法 1 与方法 2 还可以看出，采用等效方法后，单次迭代计算时间要低于分层法。

3.2.2 基于改进 CESMC 方法的变电站可靠性影响分析

本文将利用改进 CESMC 方法研究变电站可靠性对输电系统可靠性的影响，对方案 2—方案 4 进行可靠性评估。CESMC 预抽样阶段得到的变电站等效模型最优可靠性参数如表 6 所示。

基于表 6 的最优参数，计算系统可靠性指标并修正，4 个方案可靠性参数计算过程如图 7 所示。

依据图 7，比较利用改进 CESMC 对 4 种方案评估的结果可以看到，方案 1 的收敛速度最快，方案 2 和方案 3 次之，方案 4 收敛速度最慢。这说明，考虑变电站可靠性模型对可靠性评估的收敛过程有一定影响，考虑的变电站等效元件越多，系统的收敛速度越慢；此外，即使是相同的站内接线类型，接在不同节点上也会有不同的影响效果。

累计并计算 4 种方案的可靠性评估结果，并将其可靠性指标统计在表 7 中。纵向比较表 7 所记录的方案 1—方案 4 这 4 种方案的可靠性指标结果可

表 5 方案 2 下不同评估方法的可靠性指标计算结果

Table 5 Reliability indices results of different evaluation methods under case 2

评估方法	LOLP/10^{-4}	LOLF/(次·a^{-1})	EENS/(10^2 MWh·a^{-1})	计算时长/s
方法 1	1.516 4	1.652 1	2.269 3	75 034
方法 2	1.488 6	1.600 3	2.196 3	19 571
方法 3	1.506 0	1.596 6	2.221 7	7 636

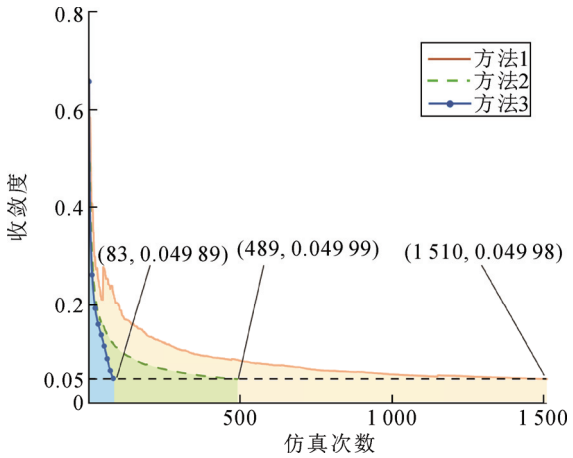


图 6 方案 2 可靠性评估迭代过程

Fig.6 Reliability evaluation process of case2

表 6 方案 2—4 下预抽样阶段变电站最优可靠性参数值

Table 6 Optimal reliability parameters of pre-sampling stage under case 2—case 4

方案	元件	v^*_{Dk}	v^*_{Fk}
2	变电站 A	0.000 103	0.042 150 8
3	变电站 B	0.000 245	0.024 761 8
4	变电站 A	0.000 104	0.073 346 5
	变电站 B	0.000 245	8.961 9×10^{-6}

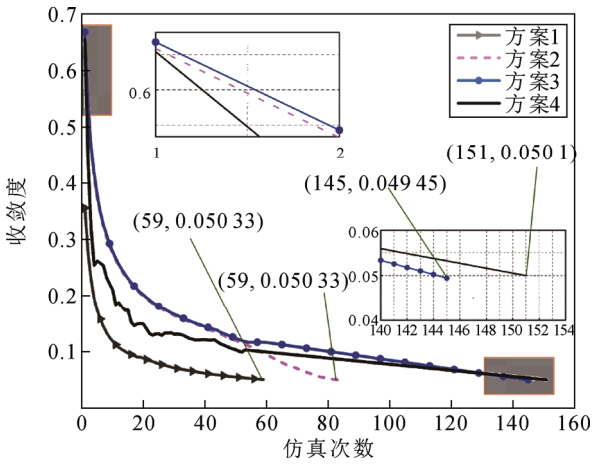


图 7　4 种方案可靠性评估的迭代过程

Fig.7　Reliability evaluation process of four cases

以看到，方案 1 的可靠性指标最小，而方案 4 的可靠性指标最大。这说明考虑变电站可靠性模型后，系统整体的可靠性水平有所下降。这是因为变电站一旦发生连通性中断故障，将会直接引起系统的负荷损失，对可靠性影响比较大。

同时，从表 7 可以看出，考虑变电站 A 得到的指标高于考虑变电站 B 得到的指标，这是由变电站自身的可靠性水平差异性引起的。依据表 3 和表 4 可以看出，变电站 A 自身可靠性水平低于变电站 B，进而导致系统整体可靠性降低得更多。此外，同时考虑 A 与 B 后，可靠性指标进一步降低。因此可以得出结论，变电站的可靠性模型参数对系统的可靠性也有一定影响。

综上所述，变电站的可靠性对系统整体的可靠性水平确实存在影响。考虑变电站接入后，系统的可靠性会有所下降，这也进一步说明考虑变电站可靠性模型对求取准确的系统可靠性模型的重要性。

4　结论

1）本文提出的改进 CESMC 输变电联合系统可靠性评估方法经验证计算时间成本约为基于分层 SMC 评估法的 10%，约为未经加速等效 SMC 方法的 40%，在保证可靠性计算结果准确性的基础上明显提升了计算速度。

2）通过比较不同实验方案的可靠性指标可知，变电站可靠性对系统可靠性存在一定程度的影响。具体表现为：一方面，考虑变电站可靠性模型后，系统的可靠性指标数值会增大，随着系统内变电站等效元件数量的增加，系统的可靠性水平逐渐降低；另一方面，不同的变电站可靠性参数对系统的可靠性影响不同，变电站自身可靠性水平越高，输变电整体可靠性水平也越高。

表 7　方案 1—方案 4 分别采用 CESMC 与 SMC 方法评估的可靠性指标计算结果

Table 7　Reliability indices results of case 1—case 4 calculated with CESMC and SMC method

方案	LOLP/10^{-4}	LOLF/(次·a^{-1})	EENS/(10^2 MWh·a^{-1})
1	1.488 6	1.600 3	2.196 3
2	1.506 0	1.596 6	2.221 7
3	1.495 1	1.530 8	2.079 9
4	1.548 8	1.930 0	2.455 3

3）在进行变电站设计时，可以将变电站可靠性指标作为一个重要的参考依据，利用本文所提出的方法，通过比较不同主接线类型对系统可靠性水平的影响，进行最优设计方案优选。此外，本文所提出的改进 CESMC 算法分析的是广义三状态元件模型，因此除变电站等效三状态元件外，包含任意其他可以转化为三状态模型的系统均可利用本文所述方法进行可靠性评估。

参考文献　References

[1] SARANTAKOS I, GREENWOOD D M, YI J L, et al. A method to include component condition and substation reliability into distribution system reconfiguration[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 109: 122-138.

[2] 栗　然，李永彬，翟晨曦，等. 基于集对分析和风险理论的变电站主接线综合评价[J]. 电力系统保护与控制，2017，45(11)：81-88.
LI Ran, LI Yongbin, ZHAI Chenxi, et al. Comprehensive evaluation of substation main connection based on set pair analysis and risk theory[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 81-88.

[3] 刘志伟，王廷涛，栗　磊，等. 变压器多级检修与月度机组组合联合优化模型[J]. 高电压技术，2022，48(增刊 1)：110-117.
LIU Zhiwei, WANG Tingtao, LI Lei, et al. Combined optimization model of transformer multi-level maintenance and monthly unit combination[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(Supplement 1): 110-117.

[4] 邓奥攀，胡志坚，胡美玉，等. 同时计及设备老化与不完全维修的电力系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制，2017，45(3)：69-74.
DENG Aopan, HU Zhijian, HU Meiyu, et al. Power system reliability evaluation considering deterioration and imperfect maintenance of equipment[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 69-74.

[5] BAGEN B, HUANG D G, FATTAL K. Enhanced probabilistic approach for substation reliability assessment[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(12): 2488-2495.

[6] LI W Y, LU J P. Risk evaluation of combinative transmission network and substation configurations and its application in substation planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 1144-1150.

[7] 陈　晨，刘俊勇，刘友波，等. 一种考虑变电站内部的电力系统可靠性分析[J]. 电力自动化设备，2015，35(2)：103-109.
CHEN Chen, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Power system reliability analysis considering substation interior[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 103-109.

[8] YANG H Y, ZHANG K J, TANG A H. Risk assessment of main electrical connection in substation with regional grid safety constraints[J].

IEEE Access, 2022, 10: 27750-27758.
[9] 程 林，刘满君，叶聪琪，等. 基于变电站主接线等效模型的全电压等级可靠性评估方法[J]. 电网技术，2015，39(1)：29-34.
CHENG Lin, LIU Manjun, YE Congqi, et al. Overall voltage level reliability assessment of power system based on equivalent model of substations[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 29-34.
[10] 许鹏程，陈 启，刘宗歧，等. 考虑主网与变电站主接线影响的配电网可靠性评估[J]. 现代电力，2016，33(6)：46-50.
XU Pengcheng, CHEN Qi, LIU Zongqi, et al. Reliability assessment of distribution network considering the influence of transmission system and substations[J]. Modern Electric Power, 2016, 33(6): 46-50.
[11] PENG L B, HU B, XIE K G, et al. Analytical model for fast reliability evaluation of composite generation and transmission system based on sequential Monte Carlo simulation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 109: 548-557.
[12] YU H H, CHANG K H, HSU H W, et al. A Monte Carlo simulation-based decision support system for reliability analysis of Taiwan's power system: framework and empirical study[J]. Energy, 2019, 178: 252-262.
[13] MIRANDA F L, DE OLIVEIRA W L, DIAS B H, et al. Composite power system reliability evaluation considering stochastic parameters uncertainties[J]. IEEE Latin America Transactions, 2020, 18(11): 2003-2010.
[14] 程 林，常 垚，刘满君，等. 基于伪时序状态转移抽样法评估含储能电力系统可靠性[J]. 电力系统自动化，2014，38(7)：53-59.
CHENG Lin, CHANG Yao, LIU Manjun, et al. Reliability evaluation of energy storage integrated power system based on pseudo-sequential state transition sampling algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(7): 53-59.
[15] SHU Z, JIRUTITIJAROEN P, DA SILVA A M L, et al. Accelerated state evaluation and Latin hypercube sequential sampling for composite system reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1692-1700.
[16] 郭创新，刘祝平，冯 斌，等. 新型电力系统风险评估研究现状及展望[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3394-3404.
GUO Chuangxin, LIU Zhuping, FENG Bin, et al. Research status and prospect of new-type power system risk assessment[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3394-3404.
[17] WANG Y, GUO C X, WU Q H. A cross-entropy-based three-stage sequential importance sampling for composite power system short-term reliability evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4254-4263.
[18] ZHAO Y, TANG Y, LI W Y, et al. Composite power system reliability evaluation based on enhanced sequential cross-entropy monte Carlo simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3891-3901.
[19] 韩肖清，李廷钧，张东霞，等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3036-3046.
HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036-3046.
[20] 王 越，郭创新，文云峰，等. 一种三段式序贯交叉熵重采样方法及其在电力系统短期可靠性评估中的应用[J]. 中国电机工程学报，2013，33(28)：94-100.
WANG Yue, GUO Chuangxin, WEN Yunfeng, et al. A three-stage sequential cross-entropy importance sampling method and its application in composite power system short-term reliability evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 94-100.
[21] DA SILVA A M E, GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ R A, FLÁVIO S A, et al. Composite reliability evaluation with renewable sources based on quasi-sequential Monte Carlo and cross entropy methods[C]//Proceedings of 2014 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS). Durham, UK: IEEE, 2014: 1-6.
[22] GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ R A, DA SILVA A M E. Reliability assessment of time-dependent systems via sequential cross-entropy monte carlo simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2381-2389.
[23] ZHAO Y, HAN Y H, LIU Y, et al Cross-entropy-based composite system reliability evaluation using subset simulation and minimum computational burden criterion[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(6): 5198-5209.
[24] 宗炫君，袁 越，王 敏，等. 含风电场的发电系统可靠性分析[J]. 电力系统及其自动化学报，2014，26(10)：41-45.
ZONG Xuanjun, YUAN Yue, WANG Min, et al. Reliability analysis of generation system with wind farms[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(10): 41-45.
[25] 李文沅. 电力系统风险评估：模型、方法和应用[M]. 北京：科学出版社，2006.
LI Wenyuan. Risk assessment of power systems: models, methods, and applications[M]. Beijing, China: Science Press, 2006.
[26] 文习山，蓝 磊，蒋日坤. 采用 Markoy 模型的输电线路及绝缘子运行风险评估[J]. 高电压技术，2011，37(8)：1952-1960.
WEN Xishan, LAN Lei, JIANG Rikun. Operating risk assessment for transmission and line insulators using Markov model[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(8): 1952-1960.
[27] 张志华. 可靠性理论及工程应用[M]. 北京：科学出版社，2012.
ZHANG Zhihua. Reliability theory and engineering application[M]. Beijing, China: Science Press, 2012.
[28] 王英英，罗 毅，涂光瑜，等. 电力系统连锁故障的关联模型[J]. 电工技术学报，2012，27(2)：204-209.
WANG Yingying, LUO Yi, TU Guangyu, et al. Correlation model of cascading failures in power system[J]. Transactions of China Electrotechnical society, 2012, 27(2): 204-209.
[29] 芦晶晶，杜松怀，韦永忠，等. 基于三点估计法的新能源电网快速风险评估[J]. 高电压技术，2017，43(1)：172-180.
LU Jingjing, DU Songhuai, WEI Yongzhong, et al. Three point estimation method for rapid risk evaluation of transmission system with new energy[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 172-180.
[30] 杨锡运，刘玉奇，张 璜，等. 含并网光伏电站的系统可靠性评估方法[J]. 高电压技术，2016，42(9)：2689-2696.
YANG Xiyun, LIU Yuqi, ZHANG Huang, et al. Reliability evaluation method of grid connected with photovoltaic power station[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2689-2696.
[31] KIM Y K, LEE G S, YOON J S, et al. Evaluation for maximum allowable capacity of renewable energy source considering AC system strength measures[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(2): 1123-1134.



李 晨
1998—，男，硕士生
主要研究方向为智能电网运行与控制
E-mail: 997389503@qq.com

LI Chen



唐爱红(通信作者)
1969—，女，博士，教授，博导
主要研究方向为智能电网运行与控制、柔性交直流输电
E-mail: 375943243@qq.com

TANG Aihong
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2023-03-16 修回日期 2023-09-10 编辑 何秋萍