# 基于多重故障和混合仿真算法的风电系统概率短路分析

李生虎，钱 壮，黄杰杰，董王朝

(合肥工业大学电气与自动化工程学院，安徽 合肥 230009)

**摘要：**多重故障、风电并网增加了概率短路计算难度。引入双馈风电机组潮流算法，计及风速不确定性，得到概率短路前初始运行方式。引入多重短路算法，计算节点电压和支路电流的期望、方差以及概率分布。对枚举故障线路进行概率加权，抽样确定其他故障参数，建立混合仿真算法。综合考虑解析枚举和概率抽样特点，提出混合概率仿真方差计算公式。算例分析对比了风电出力波动、双重短路对概率短路计算结果的影响，比较了三序电压和电流的收敛性。研究结果为电气设备选择和电网安全分析提供了参考数据。

**关键词：**概率短路；多重故障；风电系统；混合仿真；故障分析

## Probabilistic short-circuit analysis of wind power systems with multiple contingencies and hybrid sampling

LI Shenghu, QIAN Zhuang, HUANG Jiejie, DONG Wangchao

(School of Electrical Engineering and its Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Multiple-contingency and wind power integration add difficulty for probabilistic short-circuit analysis (PSCA). The power flow model with doubly-fed induction generators (DFIGs) is introduced, which together with wind uncertainty yields initial state before contingency. The multiple-contingency algorithm is introduced to find expectation, variance, and distribution of the bus voltages and the branch currents. A hybrid probabilistic sampling technique is proposed with the fault branch enumerated and probabilistically weighted, and other fault parameters sampled. The variance for the hybrid simulation is proposed by combined analytical enumeration and probabilistic sampling. Numerical analysis quantifies impact of wind fluctuation and double contingencies on the PSCA results, and compares convergence of sequential voltages and currents. The proposed models provide reference to select electrical equipment and analyze power system security.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277049).

**Key words:** probabilistic short-circuit; multiple contingencies; wind power system; hybrid sampling; contingency analysis

中图分类号： TM713 文章编号： 1674-3415(2015)23-0001-07

## 0 引言

短路计算是电网故障分析的基本内容之一，用于整定继电保护、选择控制设备、分析暂态稳定性[1-3]。电网设备选择和稳定校验一般已考虑 $N$–1 故障，因此单重故障分析价值有限[4]。多重短路概率较小，但是后果非常严重。文献[5]根据相位关系得到边界条件方程，再根据各故障逻辑上的串并联关系，建立序网电压方程，联立求解。多重短路时，短路类型、特殊相、位置未必一致，但服从一定概率分布。概率短路分析(Probabilistic Short-Circuit Analysis, PSCA)考虑短路参数不确定性，计算节点电压、线路电流期望值、方差和概率分布，用于全面衡量电网和设备运行风险[6-7]。

忽略电网初始运行方式、取故障前空载，短路计算过于粗略。考虑到网络结构变化、负荷波动和发电机调度方案不同，潮流分布具有不确定性，继而影响 PSCA 结果[8]。随着风电并网容量增加，风电功率对电网潮流影响越来越大[9-12]。如何量化风电随机性对 PSCA 影响，目前未见相关研究。

基金项目：国家自然科学基金(51277049)

概率仿真方法包括模拟(抽样)和解析法等[13-14]。文献[15]采用蒙特卡罗抽样进行概率稳定分析，样本大多为无故障样本，计算效率低。解析枚举不会重复，但需离散处理短路位置等连续变量[16]。混合概率仿真结合两者优点，枚举原发短路设备，抽样确定其他短路参数及保护和重合闸动作特性，曾用于概率稳定分析[17]。文献[18]采用该方法搜索电网连锁故障模式，计算电网失稳概率。文献[19-20]对于给定故障，建立不稳定概率和参数间关系。由于模拟法和概率法算法不同，现有混合仿真研究都只计算概率，在计算方差和收敛性时存在难度，未见相关研究成果。

本文研究了风电系统概率短路问题。引入双馈风电机组潮流算法，计及风速不确定性，得到概率潮流分布。枚举两重短路，抽样确定故障位置、类型和故障相，基于通用边界条件计算短路参数并概率加权。根据混合概率仿真原理，提出其方差计算公式，量化收敛特性。计算结果比较了风电并网、双重短路加入前后各节点电压、电流的期望、方差和概率分布，以及三序电压、电流的收敛性，验证了该算法的可行性和应用价值。

## 1　风电系统短路算法

### 1.1 故障前初始运行方式不确定性

初始运行方式不确定性包括节点注入功率变化、网络结构变化等，在此以风电为例分析。风力机捕捉机械功率 $P_{\mathrm{wt}}$ 见式(1)，其中 $\rho$ 是空气密度，$A$ 是扫风面积，$\upsilon_{\mathrm{w}}$ 是风速，$C_{\mathrm{p}}$ 是风能利用系数。在最大功率点跟踪(MPPT)方式时，风力机最优转速和最大出力由风速决定。

$$P_{\mathrm{wt}}=\frac{\rho A\upsilon_{\mathrm{w}}^{3}}{2}C_{\mathrm{p}} \tag{1}$$

考虑电机损耗后，风电机组注入电网功率小于 $P_{\mathrm{wt}}$，因此需要将其引入潮流计算。图 1 给出了双馈感应发电机(DFIG)结构。令 $I$、$V$、$R$、$X$、$Z$、$S$、$s$ 分别表示电流、电压、电阻、电抗、阻抗、功率和转差率，下标 s、m、r、g、T 分别表示定子节点、定转子间虚拟节点、转子(转子变流器)、网侧变流器和升压变压器。

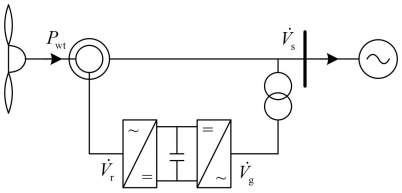



图 1 双馈风电机组

Fig. 1 Doubly-fed induction generator (DFIG)

DFIG 内部约束包括 m 点功率平衡式(2)、g 点功率平衡式(3)、转矩平衡方程式(4)，其中 $T$ 为转矩，$P_{\mathrm{em}}$ 为电磁功率。

$$\begin{cases}\Delta P_{\mathrm{m}}=-P_{\mathrm{ms}}-P_{\mathrm{mr}}=0\\ \Delta Q_{\mathrm{m}}=-Q_{\mathrm{ms}}-Q_{\mathrm{mr}}-Q_{\mathrm{mm}}=0\end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases}\Delta P_{\mathrm{g}}=-P_{\mathrm{gs}}-P_{\mathrm{rm}}=0\\ \Delta Q_{\mathrm{g}}=Q_{\mathrm{g,set}}-Q_{\mathrm{gs}}=0\end{cases} \tag{3}$$

$$\Delta T=-\frac{P_{\mathrm{wt}}}{1-s}-P_{\mathrm{em}}=0 \tag{4}$$

由于绕组有功损耗在潮流求解前未知，s 点对外建立有功无功平衡方程式(5)，对内只能建立无功平衡方程式(6)。将 DFIG 与电网联立求解，即可扩展潮流方程。

$$\begin{cases}\Delta P_{\mathrm{s}}=-P_{\mathrm{sm}}-P_{\mathrm{sg}}-P_{\mathrm{s}}=0\\ \Delta Q_{\mathrm{s}}=Q_{\mathrm{DFIG,set}}-Q_{\mathrm{s}}=0\end{cases} \tag{5}$$

$$\Delta Q_{\mathrm{s}}=Q_{\mathrm{sm}}+Q_{\mathrm{sg}}+Q_{\mathrm{DFIG,set}}=0 \tag{6}$$

一般认为风速符合 Weibull 分布，其概率密度函数见式(7)，其中 $k$ 和 $c$ 分别为形状参数和尺度参数。计算各区间风速均值和分布概率，也可用于解析算法。

$$f\left(\upsilon_{\mathrm{w}}\right)=\frac{k}{c}\left(\frac{\upsilon_{\mathrm{w}}}{c}\right)^{k-1}\mathrm{e}^{\left[-\left(\frac{\upsilon_{\mathrm{w}}}{c}\right)^{k}\right]} \tag{7}$$

### 1.2 双重故障模型

多重故障计算原理相同，以下以双重故障为例予以建模，其通用边界条件见式(8)和式(9)，其中 $n$ 为移相系数，下标 c 和 b 分别表示串、并联。

$$\begin{cases}n_{\mathrm{c}(1)}\dot{I}_{1(1)}=n_{\mathrm{c}(2)}\dot{I}_{1(2)}=n_{\mathrm{c}(0)}\dot{I}_{1(0)}\\ n_{\mathrm{c}(1)}\dot{V}_{1(1)}+n_{\mathrm{c}(2)}\dot{V}_{1(2)}+n_{\mathrm{c}(0)}\dot{V}_{1(0)}=0\end{cases} \tag{8}$$

$$\begin{cases}n_{\mathrm{b}(1)}\dot{I}_{1(1)}+n_{\mathrm{b}(2)}\dot{I}_{1(2)}+n_{\mathrm{b}(0)}\dot{I}_{1(0)}=0\\ n_{\mathrm{b}(1)}\dot{V}_{1(1)}=n_{\mathrm{b}(2)}\dot{V}_{1(2)}=nN_{\mathrm{b}(0)}\dot{V}_{1(0)}\end{cases} \tag{9}$$

多重故障有串串、并并和串并三种形式。串串型故障序网电压方程见式(10)，其中上标 0 表示开路，下标 1 和 2 表示两个端口，$h$ 表示三序(正、负、零序)，$Z_{11}$ 和 $Z_{22}$ 为端口自阻抗，$Z_{12}$ 和 $Z_{21}$ 为端口间互阻抗。

$$\begin{bmatrix}\dot{V}_{1(h)}\\ \dot{V}_{2(h)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Z_{11(h)} & Z_{12(h)}\\ Z_{21(h)} & Z_{22(h)}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_{1(h)}\\ \dot{I}_{2(h)}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\dot{V}_{1}^{(0)}\\ \dot{V}_{2}^{(0)}\end{bmatrix} \tag{10}$$

对上式部分求逆，得串并型故障序网电压方程式(11)，其中 $\dot{I}_{y2}$ 为端口 2 短路电流，$H_{11}$ 量纲同阻抗，$H_{22}$ 量纲同导纳，$H_{12}$、$H_{21}$ 无量纲。

$$\begin{bmatrix}\dot{V}_{1(h)}\\ \dot{I}_{2(h)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}H_{11(h)} & H_{12(h)}\\ H_{21(h)} & H_{22(h)}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_{1(h)}\\ \dot{V}_{2(h)}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\dot{V}_{1}^{(0)}\\ \dot{I}_{y2}\end{bmatrix} \tag{11}$$

对式(10)整体求逆，得到并并型故障序网电压方程式(12)，其中 $\dot{I}_{y1}$ 为端口 1 短路电流，$Y_{11}$、$Y_{22}$ 为端口自导纳，$Y_{12}$ 和 $Y_{21}$ 为端口间互导纳。

$$\begin{bmatrix}\dot{I}_{1(h)}\\ \dot{I}_{2(h)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Y_{11(h)} & Y_{12(h)}\\ Y_{21(h)} & Y_{22(h)}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{V}_{1(h)}\\ \dot{V}_{2(h)}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\dot{I}_{y1}\\ \dot{I}_{y2}\end{bmatrix} \tag{12}$$

## 2　风电系统概率短路算法

### 2.1 基于混合概率仿真的 PSCA 算法

通常采用变异系数 $\beta$ 作为抽样收敛的判据式(13)，$\beta$ 越小说明收敛性越好。

$$\beta=\frac{\sqrt{\hat{D}(\hat{E}(F))}}{\hat{E}(F)}=\frac{\sqrt{D(F)}}{\sqrt{N}E(F)} \tag{13}$$

如果样本容量 $N$ 足够大，抽样方法可以模拟所有任意高重故障。但考虑线路故障概率很小，很多样本为无故障样本，计算效率低。因此本文引入混合概率仿真算法(图 2)，即风速和短路线路采用解析枚举、概率加权，故障线路上具体短路点和故障参数采用抽样确定(表 1)。若有 $L$ 条线路，单重故障有 $L$ 种组合，双重故障有 $C_L^2$ 种组合。令 $P_i$ 和 $P_j$ 分别为线路 $i$、$j$ 短路概率，忽略线路故障间相关性，同时故障概率为 $P_iP_j$。

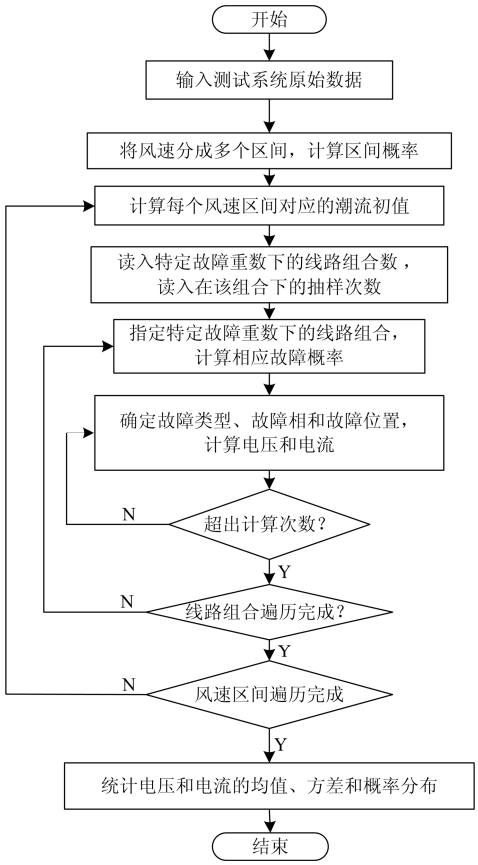



**图 2 概率短路分析的混合概率仿真算法**

Fig. 2 Hybrid probabilistic simulation for PSCA

**表 1 短路参数不确定性**

Table 1 Uncertainty of location and parameters of short-circuit fault

| 不确定因素 | 特性 | 概率分布 | 建模方式选择 | 本文选择 |
|---|---|---|---|---|
| 节点注入功率 | 连续 | 风速(Weibull 分布) | 枚举：划分风速区间，计算其区间均值和概率，然后抽样 | √ |
| | | | 抽样 | |
| | | 负荷(正态分布) | 枚举 | |
| | | | 抽样 | |
| 短路线路 | 离散 | 多年统计得到强迫停运率(FOR) | 枚举：单重或高重，概率加权 | √ |
| | | | 抽样：抽样[0, 1]均匀分布随机数 $r$，$r$≤FOR 时认为短路 | |
| 短路位置 | 连续 | 起点－终点间均匀分布(变压器未考虑) | 抽样：抽样[0, 1]均匀分布随机数 $r$，认为 $r$ 是距离线路始端百分比 | √ |
| 短路类型(单相接地、两相相间、两相接地、三相短路) | 离散 | 假设发生概率分别为 75%、10%、10%、5% | 抽样：抽样[0, 1]均匀分布随机数 $r$，$r$≤0.75 单相接地，0.75<$r$≤0.85 两相相间短路，0.85<$r$≤0.95 两相接地短路，$r$>0.95 三相短路 | √ |
| | | | 枚举：概率加权 | |
| 故障相 | 离散 | 三相概率相等 | 抽样：单相短路时，故障相为 A、B 或 C 概率相等，各占 1/3。两相短路时，非故障相为 A、B 或 C 概率相等，各占 1/3 | √ |
| | | | 枚举：概率加权 | |

### 2.2 混合概率仿真的方差算法

如果对样本空间 $\Omega$ 进行无遗漏、无重复枚举，每个样本 $X_i$ 性能指标为 $F(X_i)$，发生概率为 $P(X_i)$，则性能指标的均值 $E(F)$和方差 $D(F)$为

$$E(F)=\sum_{X_i\in\Omega}\left[F(X_i)P(X_i)\right] \tag{14}$$

$$D(F)=\sum_{X_i\in\Omega}\left\{\left[F(X_i)-E(F)\right]^2P(X_i)\right\} \tag{15}$$

考虑参数分布，抽样样本出现可能。由于样本容量有限(远小于样本空间)，性能指标期望值和方差的估计值(用上标^表示)为

$$\hat{E}(F)=\frac{1}{N}\sum_{X_i\in\Omega}F(X_i) \tag{16}$$

$$\hat{D}(F)=\frac{1}{N-1}\sum_{X_i\in\Omega}\left[F(X_i)-\hat{E}(F)\right]^2 \tag{17}$$

混合概率算法结合解析枚举和概率抽样，前提为故障已经发生，因此不能直接应用上述公式，需要考虑解析枚举对应的条件概率，计算性能指标期望值 $\hat{E}'(F)$ 为

$$\hat{E}'(F)=\sum_{k=1}^{W}\left\{\sum_{l=1}^{G}\left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}F(X_i)\right]P(l)\right\}P(k) \tag{18}$$

式中：$W$ 为风速分成的区间数；$G$ 为线路组合总数；$P(l)$ 为第 $l$ 种线路组合的故障概率；$P(k)$ 为第 $k$ 个风速区间的概率。

节点电压和支路电流在正常情况下均存在，因此需要计及无故障情况，将其加入式(18)，得到性能指标期望估计值 $\hat{E}(F)$ 为

$$\hat{E}(F)=\hat{E}'(F)+F(X)P(Z) \tag{19}$$

式中：$F(X)$为正常情况下的性能指标；$P(Z)$为线路正常概率。

混合仿真时，正常方式下性能指标没有参与抽样，所以方差不能直接用式(15)或式(17)计算。利用条件化方法，通过计算 $\hat{E}(F^2)$ 和 $\hat{E}(F)$ 而得到混合抽样的方差。根据样本的二阶原点矩依概率收敛于总体二阶原点矩，计算得 $\hat{E}'(F^2)$ 为

$$\hat{E}'(F^2)=\sum_{k=1}^{W}\left\{\sum_{l=1}^{G}\left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(F(X_i)\right)^2\right]P(l)\right\}P(k) \tag{20}$$

加上正常情况样本二阶原点矩，得到 $\hat{E}(F^2)$，计算样本方差 $\hat{D}(F)$。

$$\hat{E}(F^2)=\hat{E}'(F^2)+\left(F(X)\right)^2P(Z) \tag{21}$$

$$\hat{D}(F)=\frac{WGN}{WGN-1}\left(\hat{E}(F^2)-\left(\hat{E}(F)\right)^2\right) \tag{22}$$

## 3　算例分析

算例采用 IEEE RTS 系统，在节点 24 接入风电场。风电场容量为 100×2 MW，取 $\rho$= 1.225 kg/m$^3$，叶片半径 $R$=35.5 m，$\eta$ =94。电机参数：$V_N$=0.69 kV，$P_N$=2 MW，$p$=2，$R_s$=0.048 p.u.，$R_r$=0.018 p.u.，$X_s$=0.075 p.u.，$X_r$=0.12 p.u.，$X_m$=3.8 p.u.，$R_T$=0.01 p.u.，$X_T$=0.06 p.u.。风速 Weibull 分布参数取 $k$=3.97，$c$=10.7。以下为表示方便，用 D 表示只有单重短路情况，S 表示含有双重短路和单重短路情况，PF 表示初始条件为常规潮流，DPF 表示初始条件为含双馈电机的潮流。

### 3.1 计及多重短路的概率短路结果比较

#### 3.1.1 节点电压变化情况

表 2 给出部分节点电压期望和方差。相较于单重短路，双重短路后正序电压期望降低，负序和零序电压期望增加，同时三序电压方差增加。图 3 给出三序电压累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)。双重短路后正序电压处在较小数值区间内概率大，负序和零序电压处在较小数值区间内概率小，三序电压分散性较大。

**表 2 不同故障重数下电压期望和方差比较**

Table 2 Comparison of voltage expectation and variance under different fault multiplicity

| 节点 | 类型 | 期望值/p.u. | | | 方差/p.u. | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 正序 (×10$^{-1}$) | 负序 (×10$^{-3}$) | 零序 (×10$^{-3}$) | 正序 (×10$^{-4}$) | 负序 (×10$^{-4}$) | 零序 (×10$^{-3}$) |
| 3 | D | 9.468 3 | 5.635 7 | 12.074 | 9.330 6 | 7.574 1 | 3.273 9 |
| | S | 9.464 9 | 5.838 5 | 12.478 | 10.284 | 7.875 8 | 3.390 6 |
| 9 | D | 9.596 5 | 6.110 7 | 13.225 | 10.939 | 8.880 3 | 3.935 5 |
| | S | 9.592 8 | 6.333 7 | 13.667 | 12.060 | 9.252 6 | 4.074 0 |
| 15 | D | 9.955 2 | 4.486 9 | 9.427 4 | 7.031 2 | 5.977 9 | 2.399 2 |
| | S | 9.952 7 | 4.678 6 | 9.738 7 | 7.650 8 | 6.306 0 | 2.478 9 |
| 23 | D | 9.945 4 | 5.293 2 | 11.354 | 8.864 8 | 7.533 5 | 3.153 4 |
| | S | 9.942 3 | 5.511 4 | 11.726 | 9.720 2 | 7.923 0 | 3.258 2 |

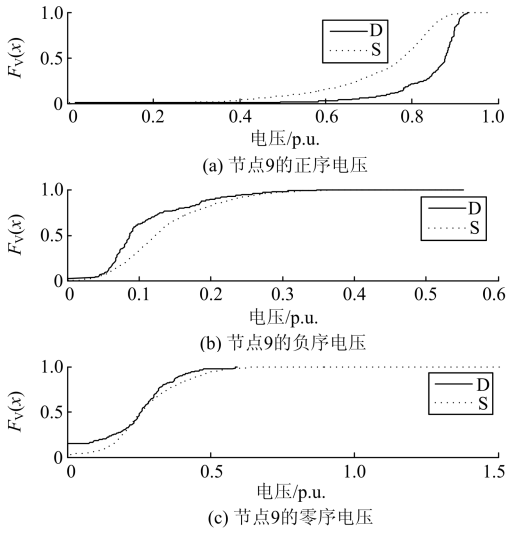



**图 3 节点三序电压的 CDF 曲线比较**

Fig. 3 CDF comparison of three sequence node voltage

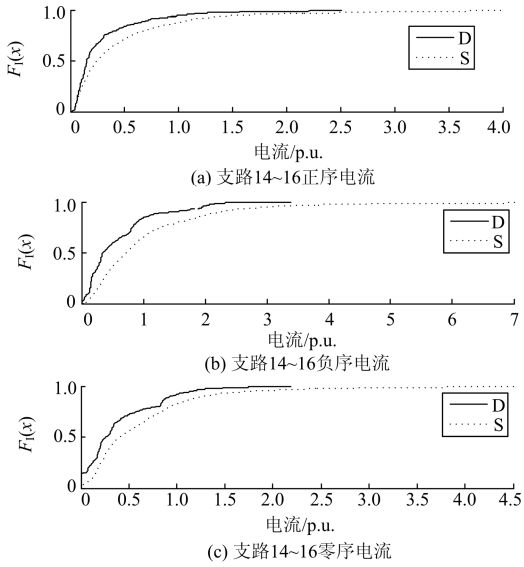
3.1.2 支路电流变化情况

表 3 给出部分支路电流的期望和方差。相较于单重短路，双重短路后，三序电流期望和方差增加。图 4 给出三序电流的 CDF 曲线。相较于单重短路，双重短路后三序电流处于较小数值区间内的概率小，且分散性较大。

**表 3 不同故障重数下电流期望和方差比较**

Table 3 Comparison of current expectation and variance under different fault multiplicity

| 支路 | 类型 | 期望值/p.u. | | | 方差/p.u. | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 正序 ($\times10^{-1}$) | 负序 ($\times10^{-2}$) | 零序 ($\times10^{-2}$) | 正序 ($\times10^{-2}$) | 负序 ($\times10^{-3}$) | 零序 ($\times10^{-3}$) |
| 2~6 | D | 6.054 0 | 1.454 5 | 1.316 1 | 1.352 5 | 14.965 | 7.211 3 |
| | S | 6.056 1 | 1.512 5 | 1.371 4 | 1.461 3 | 15.910 | 8.421 8 |
| 5~10 | D | 2.303 8 | 1.528 4 | 1.091 9 | 1.061 0 | 9.399 3 | 3.920 2 |
| | S | 2.308 0 | 1.598 4 | 1.144 0 | 1.145 5 | 13.939 | 7.270 2 |
| 14~16 | D | 25.504 | 2.933 9 | 1.974 7 | 1.733 6 | 35.832 | 14.448 |
| | S | 25.506 | 3.104 6 | 2.065 8 | 1.842 7 | 69.778 | 21.580 |
| 19~20 | D | 10.819 | 3.690 2 | 2.650 0 | 4.965 6 | 67.291 | 26.396 |
| | S | 10.831 | 4.289 0 | 2.803 0 | 5.473 3 | 414.08 | 104.43 |




(a) 支路14~16正序电流

(b) 支路14~16负序电流

(c) 支路14~16零序电流

**图 4 支路三序电流的 CDF 曲线比较**

Fig. 4 CDF comparison of three sequence branch current

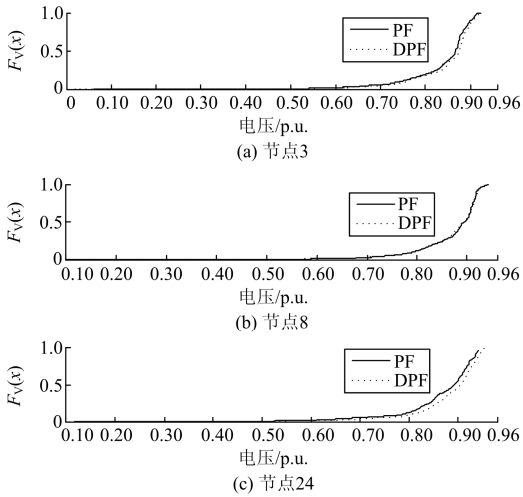
## 3.2 计及风电潮流的概率短路结果比较

表 4 给出三序电压期望和方差，图 5 给出正序电压 CDF 曲线。风电接入后相当于增加一个正序电源，因此节点正序电压期望增加，而负序和零序电压期望相应降低，离风电场越近越明显。同时三序电压方差也有降低。结合图 5，接入风电场的 24 节点 CDF 曲线变化最大，其次为风电场附近的 3 节点，受影响最小的为远离风电场的 8 节点。

**表 4 不同初始条件下电压期望和方差比较**

Table 4 Comparison of voltage expectation and variance under different initial condition

| 支路 | 类型 | 期望值/p.u. | | | 方差/p.u. | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 正序 ($\times10^{-1}$) | 负序 ($\times10^{-3}$) | 零序 ($\times10^{-3}$) | 正序 ($\times10^{-4}$) | 负序 ($\times10^{-4}$) | 零序 ($\times10^{-3}$) |
| 3 | PF | 9.456 3 | 5.986 0 | 12.691 | 10.084 | 8.456 6 | 3.547 4 |
| | DPF | 9.483 0 | 5.639 6 | 12.076 | 9.294 7 | 7.592 1 | 3.275 9 |
| 8 | PF | 9.594 1 | 5.275 5 | 11.782 | 8.392 0 | 6.969 8 | 3.200 8 |
| | DPF | 9.594 2 | 5.224 0 | 11.779 | 8.292 6 | 6.842 7 | 3.158 5 |
| 18 | PF | 10.057 | 4.502 8 | 9.386 6 | 7.095 9 | 6.442 8 | 2.477 5 |
| | DPF | 10.058 | 4.339 3 | 9.112 2 | 6.908 8 | 6.055 6 | 2.393 1 |
| 24 | PF | 9.640 0 | 5.386 4 | 11.232 | 8.573 1 | 7.579 2 | 3.002 0 |
| | DPF | 9.687 8 | 4.686 5 | 9.830 3 | 6.794 9 | 5.927 7 | 2.376 6 |




(a) 节点3

(b) 节点8

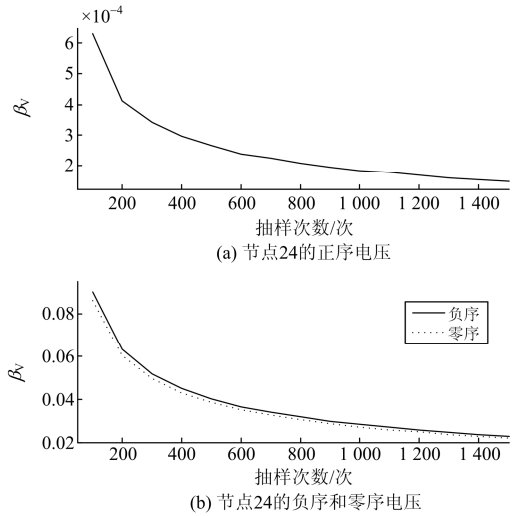
(c) 节点24

**图 5 节点正序电压的 CDF 曲线比较**

Fig. 5 CDF comparison of node positive voltage

## 3.3 混合仿真算法三序电压和电流的收敛性比较

图 6 和图 7 分别给出节点三序电压和支路三序电流变异系数随抽样次数的变化。随着抽样次数的增加，三序电压的变异系数逐渐减小。比较三序电压收敛性，正序电压的收敛性最好，零序电压其次，负序电压收敛较慢，因为正序电压在任何短路情况下都会出现，负序电压在三相短路时为零，零序电压在三相短路和两相相间短路时为零，但由于零序出现较大数值的概率大于负序，即零序电压期望较负序大，因此收敛性优于负序。三序电流是根据三序电压计算得到，因此收敛特性相似。

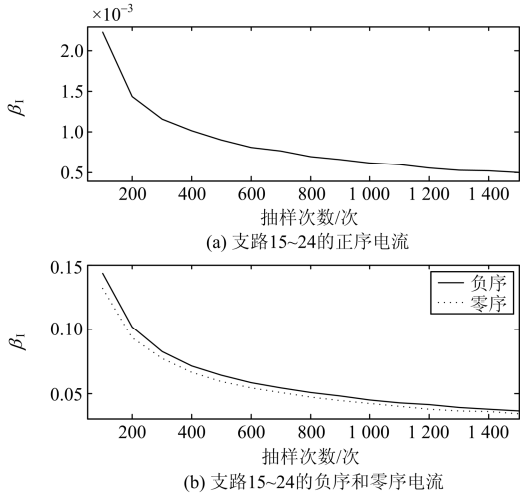



(a) 节点24的正序电压

(b) 节点24的负序和零序电压

**图 6 三序电压变异系数比较**

Fig. 6 Comparison of three sequence voltage variance coefficient




(a) 支路15~24的正序电流

(b) 支路15~24的负序和零序电流

**图 7 三序电流变异系数比较**

Fig. 7 Comparison of three sequence current variance coefficient

## 4 结论

本文计及随机风电并网和两重短路，采用混合概率仿真算法计算电压/电流概率分布特性，新提出混合仿真的方差算法，得到以下结论：

(1) 相较于单重短路，计及双重短路的概率短路结果中，正序电压降低，负序和零序电压增加，三序电流增加，节点电压和支路电流分散性增加。

(2) 风电并网相当于增加正序电源，改善了短路正序电压分布，节点离风电场越近，影响越明显。

(3) 由于不对称短路造成三序电压和电流出现概率不同以及零序参数自身的特点，正序参数收敛性最好，零序次之，负序参数收敛较慢。

## 参考文献

[1] 许侃, 范春菊, 许锦喜. 经过渡电阻短路接地故障的计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 44-51.
XU Kan, FAN Chunju, XU Jinxi. Study on calculation methods of ground fault through transition resistance[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 44-51.

[2] 田铭兴, 杨秀川, 原东昇. 多并联支路型可控电抗器短路电抗对支路电抗和电流的影响[J]. 电工技术学报, 2014, 29(7): 237-239.
TIAN Mingxing, YANG Xiuchuan, YUAN Dongsheng. Short-circuit reactances of a controllable reactor of multi-parallel branch type's influence on its branch reactances and currents[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(7): 237-239.

[3] 徐国顺, 江壮贤, 庄劲武, 等. 新型真空直流限流断路器设计及其介质恢复特性[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 171-177.
XU Guoshun, JIANG Zhuangxian, ZHUANG Jinwu, et al. A new DC vacuum current limiting circuit breaker and its dielectric recovery characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 171-177.

[4] 姜爱华, 韦化. 短路电流 $N$-$k$ 快速计算的低阶更新法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 7-12.
JIANG Aihua, WEI Hua. A fast algorithm of $N$-$k$ short-circuit current based on low-rank update method[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 7-12.

[5] 刘万顺, 黄少锋, 徐玉琴. 电力系统故障分析[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2010.

[6] BORDALO U A, RODRIGUES A B, SILVA M G D. A new methodology for probabilistic short-circuit evaluation with applications in power quality analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 474-478.

[7] BRACALE A, CARAMIA P, FAZIO A R D, et al. Probabilistic short-circuit analysis in electric power distribution systems including distributed generation[C] // 8th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion, 2012: 1-4.

[8] 杨冬, 刘玉田, 牛新生. 电网结构对短路电流水平及受电能力的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 62-67.
YANG Dong, LIU Yutian, NIU Xinsheng. Analysis on

influence of power grid structure upon short circuit level and power receiving capability[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(22): 62-67.

[9] 李生虎, 孙莎莎, 王正风. 旋转备用下双馈风电机组初值算法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 7-10.
LI Shenghu, SUN Shasha, WANG Zhengfeng. Initialization method of DFIG-based wind power units with spinning reserve[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 7-10.

[10] 朱星阳, 张建华, 刘文霞, 等. 风电并网引起电网电压波动的评价方法及应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 88-97.
ZHU Xingyang, ZHANG Jianhua, LIU Wenxia, et al. Evaluation methodology and its application of voltage fluctuation in power network caused by interconnected wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 88-97.

[11] HAO Zhenghang, YAO Zhiqing, LI Shaohua, et al. The contribution of double-fed wind farms to transient voltage and damping of power grids[J]. Tehnicki Vjesnik, 2015, 22(1): 43-49.

[12] 何世恩, 姚旭, 徐善飞. 大规模风电接入对继电保护的影响与对策[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 21-27.
HE Shien, YAO Xu, XU Shanfei. Impacts of large-scale wind power integration on relay protection and countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 21-27.

[13] 王晶, 王昉, 潘杰, 等. 全概率公式在发电系统可靠性评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 69-72, 76.
WANG Jing, WANG Fang, PAN Jie, et al. Application of total probability formula in power generation system reliability evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 69-72, 76.

[14] SONG Xiaotong, TAN Zhenyu. Power system reliability evaluation under reactive power adequacy constraints[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 170-175.

[15] 丁明, 汤海雁, 吴红斌. 含 UPFC 的电力系统概率稳定分析[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(5): 1-4.
DING Ming, TANG Haiyan, WU Hongbin. Probabilistic stability analysis of power system with UPFC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(5): 1-4.

[16] 付川, 余贻鑫, 王东涛. 电力系统暂态稳定概率[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 24-28.
FU Chuan, YU Yixin, WANG Dongtao. Transient stability probability of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 24-28.

[17] SALEH A, ROY B, MAHMUD F. Probabilistic evaluation of transient stability studies using the method of bisection[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 1990-1995.

[18] 李生虎, 丁明, 王敏, 等. 考虑故障不确定性和保护动作性能的电网连锁故障模式搜索[J]. 电网技术, 2004, 28(13): 27-28.
LI Shenghu, DING Ming, WANG Min, et al. Search of power system chained failure mode considering uncertainty of element fault and performance of protective relaying[J]. Power System Technology, 2004, 28(13): 27-28.

[19] 李文沅, 卢继平. 暂态稳定概率评估的蒙特卡罗方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 18-23.
LI Wenyuan, LU Jiping. Monte Carlo method for probabilistic transient stability assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 18-23.

[20] VAAHEDI E, LI W, CHIA T, et al. Large scale probabilistic transient stability assessment using BC Hydro's on-line tools[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 661-667.

**收稿日期：2015-02-10；　　修回日期：2015-05-19**

**作者简介：**

李生虎(1974-)，男，博士，教授，博士生导师，研究领域为电力系统规划与可靠性、风电系统分析与控制、柔性输电技术在电力系统中应用；E-mail: shenghuli@hfut.edu.cn

钱　壮(1993-)，女，硕士研究生，研究方向为风电系统概率仿真；

黄杰杰(1993-)，男，硕士研究生，研究方向为风电系统分析和控制。

(编辑　魏小丽)