

计及风速相关性的电网静态安全风险评估

张里, 刘俊勇, 刘友波, 闫占新, 许立雄, 吴杨

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 电网内的多个风电场由于地理位置比较接近, 具有较强的风速相关性, 会影响概率潮流的结果。采用 Nataf 变换建立多个风电场间的风速相关性样本空间, 进而得到具有相关性的风电场出力。以风速相关性下的系统当前运行状态为基础, 构成预想事故集, 将全概率理论与排序集采样概率潮流相结合, 进行风速相关性下的电网静态安全风险随机潮流计算, 并对电网安全风险进行评估。在风电接入改进 IEEE 30 节点系统中使用 RSMCS 方法进行仿真, 结果表明所提方法可准确、快速地评估风速相关性下系统当前运行状态的静态安全风险。

关键词: 风电; 概率潮流; Nataf 变换; 排序集采样; 风速相关性; 风险评估; 静态安全

中图分类号: TM 614; TM 734

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.04.012

0 引言

风电作为一种绿色、洁净的可再生能源, 近年来发展迅速。在风力资源丰富的地区, 地理位置邻近的多个风电场往往处于同一风带上, 其风速具有较强的相关性^[1], 从而使各风电场出力有明显相关性^[2]。

目前已有部分学者对风速相关性进行了相关研究^[3-4]。文献[5]是基于模糊模型来预测同一个风速带上的各点风速和风电场出力, 文中主要考虑各风电场间出力的时间延迟, 并未考虑同一时段下风速相关性对电网潮流的影响。文献[6]将补偿法应用于直流潮流模型, 给出了一种考虑网络配置不确定性的随机潮流算法, 但未给出系统节点电压的幅值分布。文献[7]在自回归滑动平均模型(ARMA)的基础上利用时移技术建立了风电场风速相关性下的随机时间序列^[8], 但其只考虑了风速相关性对风电并网点电压概率分布的影响, 并未分析对支路传输功率的概率分布以及对电网的安全风险评估。

本文在计及负荷随机扰动的同时, 主要研究风速相关性对电网静态安全风险的影响。首先通过随机抽样产生多维独立随机样本, 再通过 Nataf 变换得到具有相关性的多维随机样本, 从而描述风速的各种相关性, 为概率潮流提供样本数据; 然后, 根据预想事故集确定系统结构和状态, 通过排序集抽样蒙特卡洛模拟 RSMCS(Ranked Set Monte Carlo Simulation)法快速计算含有多个风电场的概率潮流; 最后研究风电接入后相关支路传输功率的置信区间, 以及线路故障后对相关支路潮流概率分布和风电场接入节点电压概率分布的影响。

收稿日期: 2014-03-26; 修回日期: 2015-01-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50977059); 国家电网公司科技项目

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50977059) and Science and Technology Project of the State Grid Corporation of China

1 风速相关性建模

1.1 风速分布与风机功率

根据大量实测数据, 绝大多数地区年平均风速分布服从 Weibull 概率分布函数^[9], 其概率密度函数为:

$$f(v) = (k/c)(v/c)^{k-1} \exp[-(v/c)^k] \quad (1)$$

其中, v 为风速; k 为形状参数; c 为尺度参数。

1.2 风速相关性模型

对于具有相关性的风速, Nataf 变换以随机变量的边缘累积分布函数和协方差矩阵为基本信息, 通过 Nataf 分布并结合基于 Cholesky 分解的线性变换, 将相关非正态随机变量直接转换为独立标准正态随机变量, 具有计算速度快和精度高等优点。因此本文采用逆 Nataf 变换对相关性的进行建模。

文献[10]首先通过边缘变换:

$$x_i = \Phi^{-1}[F_{v_i}(v_i)] \quad i=1, 2, \dots, m \quad (2)$$

其中, x_i 为标准正态分布变量; Φ 为标准正态分布变量累积分布函数; v_i 为相关性风速变量; F_{v_i} 为风速边缘累积分布函数。

引入标准正态随机向量 $\mathbf{Z} = [Z_1, Z_2, \dots, Z_m]^T$, 根据 Nataf 分布理论, $\mathbf{Z}$ 为联合正态随机向量时, $\mathbf{X}$ 为具有 Nataf 分布的随机向量, 其联合概率密度函数为:

$$f_{\mathbf{X}}(\mathbf{x}) = f(x_1)f(x_2)\cdots f(x_m) \frac{\varphi_m(\mathbf{z}, \mathbf{R}_0)}{\varphi(z_1)\varphi(z_2)\cdots\varphi(z_m)} \quad (3)$$

其中, $f_{\mathbf{X}}(\mathbf{x})$ 为联合概率密度函数; $f(x_i)$ 为变量 x_i 的概率密度函数; $\varphi(z_i)$ 为变量 z_i 的概率密度函数; $\varphi_m(\mathbf{z}, \mathbf{R}_0)$ 为具有零均值向量、单位标准差矩阵和相关系数矩阵 $\mathbf{R}_0$ 的 m 维标准正态随机向量的联合概率密度函数; $\mathbf{R}_0 = [\rho_{0,ij}]$ 为联合正态随机向量 $\mathbf{Z}$ 的相关系数矩阵。 $\mathbf{R}_0$ 的元素 $\rho_{0,ij}$ 与 $\mathbf{X}$ 的相关系数 ρ_{ij} 关系如下:

$$\rho_{0,ij} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{F_i^{-1}(\varphi(x_i)) - \mu_i}{\sigma_i} \times \frac{F_j^{-1}(\varphi(x_j)) - \mu_j}{\sigma_j} \varphi_2(x_i, x_j, \rho_{ij}) dx_i dx_j \quad (4)$$

其中, $\rho_{0,ij}$ 和 ρ_{ij} 分别为相关系数矩阵 $\mathbf{R}_0$ 和 $\mathbf{R}_X$ 的元素; μ_i, σ_i, μ_j 和 σ_j 分别为对应风速的均值和标准差; F_i^{-1} 为风速边缘累积分布逆函数; $\varphi_2(x_i, x_j, \rho_{ij})$ 为具有零均值、单位标准差和相关系数 $\rho_{0,ij}$ 的二维标准正态概率密度函数。文献[10]通过大量的数值研究, 针对各种分布类型, 给出了如下经验公式:

$$\rho_{0,ij} = F(\rho_{ij})\rho_{ij} \quad (5)$$

其中, 系数 $F(\rho_{ij}) \geq 1$, 它是相关系数 ρ_{ij} 以及边缘分布 $F(x_i)$ 的函数, 文献[11]给出了各种概率分布函数对应的系数 $F(\rho_{ij})$ 的计算公式表格。当 $\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_j$ 均服从 Weibull 分布时, $F(\rho_{ij})$ 近似满足以下关系:

$$\begin{aligned} F(\rho_{ij}) = & 1.063 - 0.004\rho_{ij} - 0.2 \left(\frac{\sigma_i}{\mu_i} + \frac{\sigma_j}{\mu_j} \right) - \\ & 0.001\rho_{ij}^2 + 0.337 \left(\frac{\sigma_i^2}{\mu_i^2} + \frac{\sigma_j^2}{\mu_j^2} \right) + \\ & 0.007\rho_{ij} \left(\frac{\sigma_i}{\mu_i} + \frac{\sigma_j}{\mu_j} \right) - 0.007 \frac{\sigma_i \sigma_j}{\mu_i \mu_j} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, μ, σ 分别为随机变量 $\mathbf{X}$ 的均值和标准差。

确定 $\mathbf{R}_0 = [\rho_{0,ij}]$ 后, 对其进行 Cholesky 分解:

$$\mathbf{R}_0 = \mathbf{L}_0 \mathbf{L}_0^T \quad (7)$$

其中, $\mathbf{L}_0$ 为 $\mathbf{R}_0$ 的下三角分解矩阵。

利用 $\mathbf{L}_0$ 可将具有相关性的标准正态分布变量 $\mathbf{X}$ 转换成独立的标准正态分布变量 $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T$:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{L}_0 \mathbf{X} \quad (8)$$

根据等概率原则的逆变换, 可得到相关系数矩阵为 ρ 的风电场风速样本空间:

$$v_i = F_i^{-1}(\Phi(y_i)) \quad i=1, 2, \dots, m \quad (9)$$

其中, $F_i^{-1}(\Phi(y_i))$ 为 Weibull 分布的逆分布函数。

上述便是 Nataf 变换计算相关性风速的过程。

2 基于全概率理论的概率潮流分析

2.1 全概率理论

电力系统运行中, 不同网络元件故障开断会导致不同的系统结构与状态, 系统潮流分布也会随之变化。由于电力系统的状态数量非常多, 须采取一定的方法降低需要考虑的状态数目。为减少计算负担, 本文只选择部分线路故障来构成预想事故集。

由全概率理论^[9], 给出当前运行状态下 K 种事件组 $A_1, A_2, \dots, A_K$ (满足 $p(A_1) + \dots + p(A_K) = 1$), 则考虑网络元件故障停运的随机潮流分布可表示为:

$$p(B) = \sum_{i=1}^K p(B|A_i)p(A_i) \quad (10)$$

其中, A_i 为第 i 种系统结构和状态; $p(A_i)$ 为第 i 种系统结构与状态发生的概率; B 为随机潮流(节点电压、支路功率); $p(B|A_i)$ 为在第 i 种系统结构与状态下的随机潮流分布; $p(B)$ 为在考虑预想事故集下的随机潮流分布。其中 $p(A_i)$ 可由线路故障停运率得到, 即:

$$p(A_i) = \prod_{i=1}^n u_i \prod_{j=1}^m (1 - u_j) \quad (11)$$

其中, u_i 为第 i 条线路的故障停运率; n 为故障支路数; m 为正常支路数。因为所选的预想事故集只是整个系统预想事故集下的一个子集, $\sum_{i=1}^K p(A_i) < 1$, 所以需要进行下列变换使之满足成为完备事故集:

$$p'(A_i) = p(A_i) / \sum_{i=1}^K p(A_i) \quad (12)$$

2.2 排序集采样

排序集采样由 Chen Z 等学者于 2000 年提出, 并广泛应用于农业、环境、经济等方面^[13-14]。该采样方法根据输入随机变量的累积分布函数先采样再排序, 使采样点更具代表性。与简单随机采样相比, 排序集采样极大地降低了采样规模, 具有采样效率高和稳定性好等特点。

a. 采样。假设 m 个随机变量 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$ 的采样规模均为 N , x_i 为矩阵中任意一个随机变量。其累积分布函数为:

$$Y_i = F_i(x_i) \quad (13)$$

采样步骤为: 首先在输入随机变量 x_i 的累积分布函数 Y_i 取值区间 $[0, 1]$ 中随机抽取 k^2 个个体, 将它们划分为 k 组, 每组 k 个; 然后对每组个体进行由小到大排序; 最后从第 1 组排好次序的样本中抽取次序第一的个体, 记为 $x_{1(1)}$; 从第 2 组中抽取次序第二的个体, 记为 $x_{1(2)}$; 从第 3 组中抽取次序第三的个体, 记为 $x_{1(3)}$; 依此类推, 直到从第 k 组中抽取次序最后的个体, 记为 $x_{1(k)}$ 。以上过程为 1 次循环, 最终从 k^2 个随机个体中筛选出容量为 k 的一组样本, 则 x_i 的采样值由反函数 $x_i = F_i^{-1}(Y_i)$ 得到。把每个随机变量的采样值排成一行, 最终形成 $m \times k$ 维的采样矩阵 $\mathbf{X}'$ 。

b. 排序。在已知输入随机变量的均值、方差和相关系数矩阵的条件下, 可生成相关系数矩阵为 $\mathbf{R}_0$ 的标准正态分布的样本矩阵 $\mathbf{Y}$, 通过变换 $\mathbf{X} = \mathbf{F}^{-1}(\Phi(\mathbf{Y}))$ 生成相关系数矩阵为 ρ 的样本矩阵 $\mathbf{X}$, 从而得到顺序矩阵 $\mathbf{C}$ 。

3 算法流程

考虑风速相关性下系统当前运行状态构造预想事故集, 对电网静态安全进行评估, 计算流程见图 1。

a. 输入基础数据,包括潮流计算所需数据、采样规模 N 、节点注入功率的期望和标准差等。

b. 根据随机变量 $\mathbf{X}$ 的概率分布和相关系数矩阵 ρ 得到修改后的相关系数矩阵 $\mathbf{R}_0$, 并对其进行 Cholesky 分解, 得到下三角矩阵 $\mathbf{L}_0$ 。

c. 对 m 个相互独立的标准正态随机分布变量进行采样, 得到样本矩阵 $\mathbf{X}_{m \times N}$, 从而得到相关性矩阵为 $\mathbf{R}_0$ 的样本矩阵 $\mathbf{Y}$, 进而得到顺序矩阵 $\mathbf{C}$ 。

d. 对输入随机变量进行排序集采样, 并按 $\mathbf{C}$ 进行排序, 得到最终样本矩阵 $\mathbf{S}_{m \times k}$ 。考虑预想事故集中每种故障事件, 将 $\mathbf{S}_{m \times k}$ 代入潮流方程求出支路注入

有功和无功功率、节点电压幅值和相角。再通过统计学方法得到输出变量的数字特征及累积分布曲线。

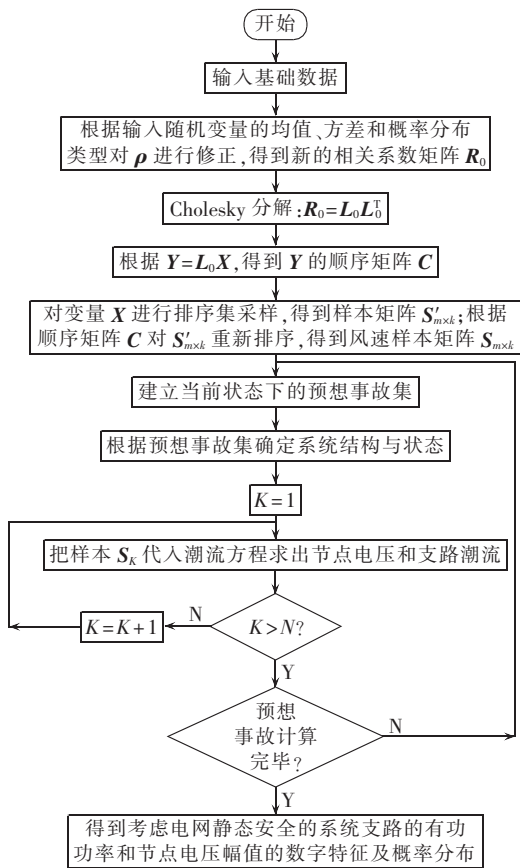


图 1 风速相关性下的电网静态安全风险评估算法流程

Fig.1 Flowchart of static security risk assessment for power grid with wind speed correlation

4 算例分析

本文采用改进后的 IEEE 30 节点算例进行仿真计算。现将该系统在原有 189.2 MW 负荷水平的基础上新增加 40 MW 的有功负荷,并按比例分配到各节点上。设节点负荷随机波动服从正态分布,其中负荷有功和无功分别以系统值为期望,标准差取期望值的 10%。在节点 25、26、29、30 上各接入一个容量为 10 MW 的风电场,如图 2 所示,相关支路故障率如表 1 所示。采用 RSMCS 概率潮流分析方法对多个风电场在风速高度相关、中度相关、低度相关和负相关 4 种情况下进行仿真,其中相关系数分别取为 0.9、0.5、0.1、-0.5。

$$\rho = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{ij} & \rho_{ij} & \rho_{ij} \\ \rho_{ij} & 1 & \rho_{ij} & \rho_{ij} \\ \rho_{ij} & \rho_{ij} & 1 & \rho_{ij} \\ \rho_{ij} & \rho_{ij} & \rho_{ij} & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

4 个风电场的风速均满足形状参数为 2.2、尺度参数为 8 的双参数 Weibull 分布;风机的切入、额定和切出风速分别为 3 m/s、12 m/s、20 m/s;风机为感

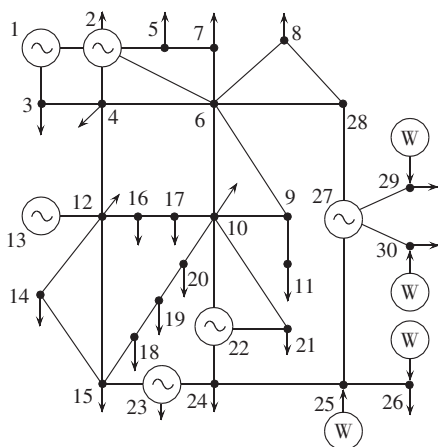


图 2 算例系统结构示意图

Fig.2 Structure of system for case study

表 1 相关支路故障率

Table 1 Failure rate of relevant branches

支路	故障率	支路	故障率
1-3	0.098 1	21-22	0.142 9
3-4	0.105 5	23-24	0.124 1
2-6	0.148 7	25-27	0.131 7
4-6	0.105 8	24-25	0.166 5
6-7	0.113 5	2-4	0.084 8
6-9	0.118 5	10-17	0.145 5
12-16	0.163 5	6-28	0.163 5
10-21	0.132 7	28-27	0.153 6

应异步发电机,其输出有功功率为:

$$P_w = \begin{cases} 0 & v < v_{in}, v \geq v_{out} \\ \frac{v - v_{in}}{v_N - v_{in}} P_N & v_{in} \leq v < v_N \\ P_N & v_N \leq v < v_{out} \end{cases} \quad (15)$$

其中, v_{in} 、 v_N 、 v_{out} 分别为风机的切入风速、额定风速和切出风速; P_N 为风机的额定功率; P_w 为风机实际功率。

采用文献[15]中无功-电压特性潮流计算方法。感应异步发电机 $Q-U$ 特性方程为:

$$Q = f(U) = -\frac{U^2}{x_m} + \frac{-U^2 + \sqrt{U^4 - 4P^2x^2}}{2x} \quad (16)$$

其中, U 为风机的机端电压; x_m 为激磁电抗; $x = x_s + x_r$, x_s 为定子漏抗, x_r 为转子漏抗; P 为风机有功功率。将式(16)代入潮流计算,并修改雅可比矩阵中对应元素。

4.1 性能评估

在 IEEE 30 节点系统对 RSMCS 方法的性能进行评估,并以采样规模为 30 000 次的 MCSM (Monte Carlo Simulation Method) 计算结果为参考值。采用输出随机变量期望值 μ 和标准差 σ 的相对误差指标 ε_s^γ 来衡量所提方法计算结果的准确程度:

$$\varepsilon_s^\gamma = \left| \frac{\alpha_{sl}^\gamma - \alpha_{sM}^\gamma}{\alpha_{sM}^\gamma} \right| \times 100\% \quad (17)$$

其中, γ 为输出随机变量的类型,包括 PQ 节点电压幅值、电压相角、支路有功和无功; ε_s^γ 为相对误差指标; s 为数字特征类型,包括期望值 μ 和标准差 σ ; α_s^γ

和 α_M^γ 分别为某一采样规模下的 RSMCS 方法和采样规模为 30000 次的 MCSM 得到的随机变量结果值。

每类输出随机变量的数量都不止一个,故本文采样每类输出变量相对误差指标 ε_s^γ 的平均值 $\bar{\varepsilon}_s^\gamma$ 表示整个系统输出随机变量的误差收敛情况。MCSM 计算收敛过程中存在随机因素,为准确评估 RSMCS 方法进行 PLF(Probabilistic Load Flow)计算的误差收敛特性,在确定采样规模下进行 100 次仿真。对于每类输出随机变量,将 100 次计算结果 ε_s^γ 的平均值 $\bar{\varepsilon}_{s,\text{mean}}^\gamma$ 作为该类结果输出随机变量的最终误差,并将这 100 次计算结果 ε_s^γ 的标准差 $\bar{\varepsilon}_{s,100}^\gamma$ 、最大值 $\bar{\varepsilon}_{s,\text{max}}^\gamma$ 和最小值 $\bar{\varepsilon}_{s,\text{min}}^\gamma$ 作为衡量算法收敛稳健性的依据。采样规模为 500 次时 RSMCS 方法得到 PQ 节点电压幅值、电压相角、支路有功和无功的误差指标见表 2。

表 2 采样规模 500 次时的相对误差指标
Table 2 Relative error indexes when sample size is 500

指标	期望值	标准差	最大值	最小值
$\bar{\varepsilon}_\mu^U$	0.0090	0.0074	0.0314	0.0078
$\bar{\varepsilon}_\sigma^U$	0.1426	0.1153	0.4658	0.0536
$\bar{\varepsilon}_\mu^\theta$	0.0308	0.0224	0.0971	0.0127
$\bar{\varepsilon}_\sigma^\theta$	0.1422	0.1251	0.5894	0.0458
$\bar{\varepsilon}_\mu^P$	0.0125	0.0092	0.0527	0.0162
$\bar{\varepsilon}_\sigma^P$	0.2024	0.1273	0.6577	0.0925
$\bar{\varepsilon}_\mu^Q$	0.0061	0.0042	0.0180	0.0012
$\bar{\varepsilon}_\sigma^Q$	2.3106	2.0251	8.5162	0.3681

采用 RSMCS 方法很容易得到输出随机变量的概率分布曲线。以支路 27-30 有功 P_{27-30} 为考察对象,采样规模为 30 000 次的 MCSM 和 500 次的 RSMCS 方法得到支路 27-30 有功 P_{27-30} 的有功概率分布(PDF)和累积分布(CDF)曲线如图 3 所示。由图 3 可知,采样规模为 500 次的 RSMCS 方法可以得到很好的拟合效果。而 RSMCS 方法只需很少的采样次数便可以达到 MCSM 采样规模很大时的精度。

4.2 线路潮流置信区间

表 3 中为不同情况下部分支路的有功置信区间 $[\mu-3\sigma,\mu+3\sigma]$,其中 μ 和 σ 分别为各支路有功的期望值和标准差。由表 3 可见,风速相关性越大,则支

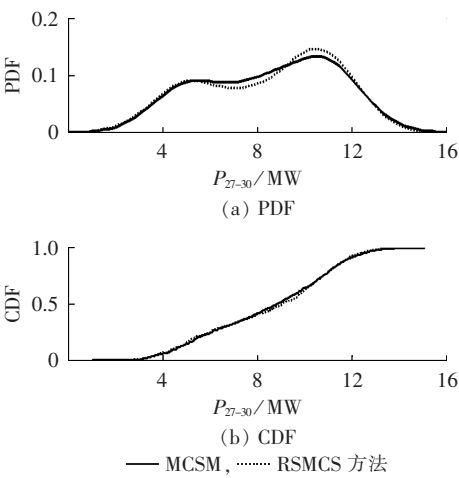


图 3 支路 27-30 有功概率分布曲线和累积分布曲线
Fig.3 Active power PDF and CDF of branch 27-30

路有功波动范围和波动幅度越大。同时支路有功波动特性与期望值呈正相关,期望值越大,其支路波动范围和波动幅度越大。值得注意的是,由于风机接入后,离风电场越近的支路(如支路 28-27),其波动范围和波动幅度越大;并同时出现有功潮流反送现象,其中有功潮流反送概率随着相关性的增大而增加,在高度相关时达到 17.5%;而离风电场较远的支路(如支路 16-17),其波动范围和波动幅度则较小。

4.3 电网静态安全风险分析

采用本文提出的考虑风速相关性下的电网静态安全风险评估,可得到支路故障下系统潮流的随机分布情况。表 4 给出了测试系统在 4 种相关性下,部分支路的故障严重程度排序表。

由表 4 可看出,由于风电出力的随机性和波动性,风速相关性对支路越限产生较大的影响。当高度相关时,风电场间出力同增同减特性明显,造成靠近风电场的支路潮流波动大,这些支路越限情况较严重(支路 28-27、23-24 等);而当负相关时,风电场间出力互补特性明显,靠近风电场的支路潮流波动平稳,越限情况相对较轻。但是在传统安全评估中,并没有考虑这种风速相关性对电网静态安全的影响,忽视了系统潜在的运行风险。因此考虑风速相关性对

表 3 不同风速相关性下部分支路有功置信区间
Table 3 Active power confidence interval of some branches for different wind speed correlations

支路	置信区间			
	高度相关	中度相关	低度相关	负相关
2-6	[14.79,25.89]	[14.92,24.85]	[15.13,23.82]	[17.50,22.48]
5-7	[12.06,16.77]	[12.11,16.68]	[12.19,16.36]	[13.10,15.46]
16-17	[9.05,10.74]	[9.06,10.70]	[9.08,10.63]	[9.22,10.48]
10-21	[-13.34,-6.26]	[-13.32,-6.51]	[-13.18,-6.89]	[-10.16,-7.93]
21-22	[-17.70,-11.70]	[-17.75,-11.91]	[-16.59,-12.28]	[-16.32,-12.56]
28-27	[-5.79,14.26]	[-5.62,13.46]	[-5.09,12.97]	[-4.57,12.86]
8-28	[-2.67,1.38]	[-2.60,1.22]	[-2.54,1.02]	[-1.51,0.80]
6-28	[-3.11,12.92]	[-2.98,12.28]	[-2.55,12.09]	[-1.57,11.56]

表 4 风速相关性下 IEEE 30 节点系统故障排序表
Table 4 Sorted faulty branches of IEEE 30-bus system for different wind speed correlations

排序	支路			
	高度相关	中度相关	低度相关	负相关
1	28-27	28-27	21-22	21-22
2	23-24	21-22	6-7	6-7
3	6-7	23-24	28-27	6-28
4	21-22	6-7	6-28	28-27
5	6-28	6-28	23-24	2-6
6	25-27	2-6	25-27	23-24
7	24-25	25-27	2-6	25-27
8	2-6	24-25	24-25	4-6
9	4-6	1-3	4-6	24-25

电网静态安全评估的影响是十分必要的。

4.4 支路随机故障的影响分析

从表 4 知,支路 28-27 故障程度最严重。因此对其进行随机开断进行分析,图 4 给出了网络结构不变和考虑支路随机故障时,支路 25-27 的有功 P_{25-27} 分布。当网络结构不变时,支路 25-27 的有功越限概率为 0。而当支路随机故障后,产生的潮流转移使支路 25-27 的有功越限概率增大。当风速呈正相关时,随着相关性增强,支路 25-27 有功潮流越限概率由 6.3%增至 11.4%;而当风速呈负相关性时,支路潮流波动较小,支路越限概率为 2.6%。这表明风速呈正相关时,各风电场出力同增同减特性明显,造成线路潮流波动较大;而风速呈负相关时对应的各风电场存在互补出力特性,可降低线路潮流波动,使系统运行更平稳。因此若不考虑风速相关性,将忽略系统的运行风险,不能对电网静态安全进行准确评估。

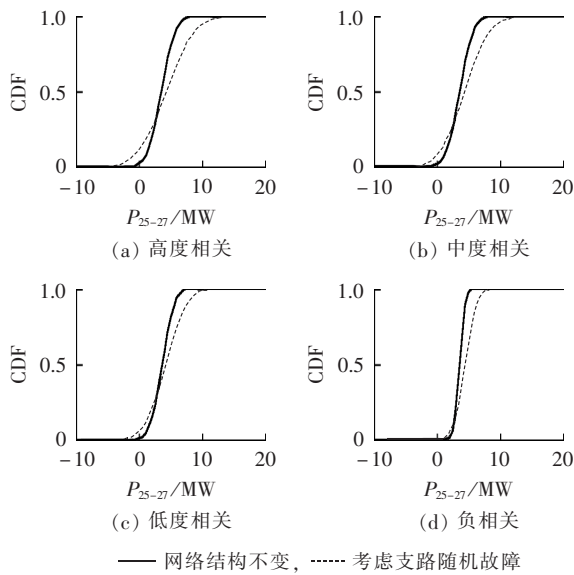


图 4 风速相关性下支路 25-27 有功累积分布比较
Fig.4 Active power CDF of branch 25-27 for different wind speed correlations

对支路 23-24 进行随机开断分析,图 5 给出了网络结构不变和考虑支路随机故障时节点 25 的电压

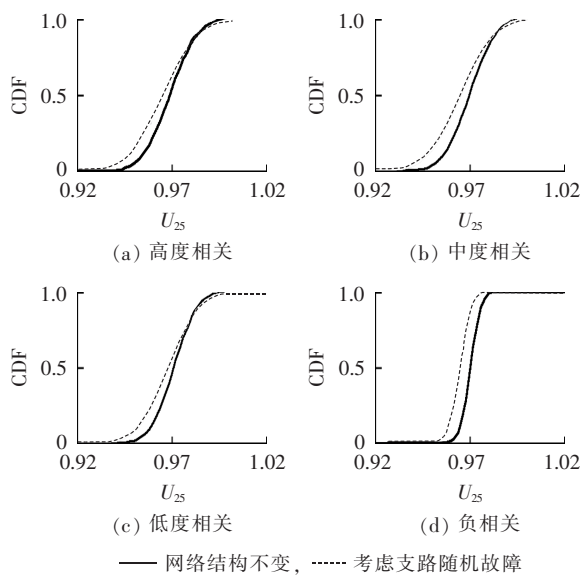


图 5 风速相关性下节点 25 电压累积分布比较
Fig.5 Voltage CDF of node 25 for different wind speed correlations

U_{25} 分布,图中 U_{25} 为标么值。当系统网络结构不变时,高度相关下节点 25 电压越限概率为 7.3%;而考虑支路随机故障后,随着风速相关性的增加,节点 25 电压越限概率由 10.5% 增加到 15.4%,风险增大。

采用 Intel i7950 CPU 为 3.07 GHz、RAM 为 6 GB 的仿真平台,对比 RSMCS 方法和 MCSM 对 IEEE 30 节点系统在该平台上的静态安全评估所需时间,结果如表 5 所示。可见,在同样精度条件下,RSMCS 方法相对于 MCSM 节约很多时间。

表 5 计算时间比较

Table 5 Comparison of computational time	
方法	计算时间/s
RSMCS 方法	71.35
MCSM	4931.64

5 结论

中国风力发电的快速发展及并网,提高了可再生能源的利用效率,而同时由于地理位置的邻近,这些风电场的风速具有较强的相关性。本文通过基于 Nataf 变换生成风速相关性样本,并考虑其对概率潮流计算结果的影响。重点研究了考虑预想事故集后,将全概率理论与 RSMCS 概率潮流分析方法相结合,得到更准确、全面的随机潮流结果。

本文方法可体现风速具有相关性时,系统结构和状态的不确定性对系统运行的影响。研究表明:当风速具有正相关性时,随着相关性的增加,各风电场间出力同增同减特性明显,因此系统的运行风险增加;而当风速具有负相关性时,各风电场间出力存在互补特性,系统的运行风险相对较小。因此考虑风速相关性后,能够对电网运行进行十分全面、准确的

评估;同时本文采用的RSMCS方法大幅减少程序运行时间,为运行人员提供更快速、准确和详尽的信息。

参考文献:

- [1] WAN Y H, MILLIGAN M, PARSONS B. Output power correlation between adjacent wind power plants[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2003, 125(4): 551-555.
- [2] 杨洪明, 王爽, 易德鑫, 等. 考虑多风电场出力相关性的电力系统随机优化调度[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 114-120.
YANG Hongming, WANG Shuang, YI Dexin, et al. Stochastic optimal dispatch of power system considering multi-wind power correlation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 114-120.
- [3] 赵继超, 袁越, 傅质馨, 等. 基于Copula理论的风光互补发电系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 124-129.
ZHAO Jichao, YUAN Yue, FU Zhixin, et al. Reliability assessment of wind-PV hybrid generation system based on Copula theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 124-129.
- [4] PAPAETHYMIU G, SCHAVEMAKER P H, van der SLUIS L, et al. Integration of stochastic generation in power systems[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2006, 28(9): 655-667.
- [5] ALEXIADIS M C, DOKOPOULOS P S, SAHSAMANOGLU H S. Wind speed and power forecasting based on spatial correlation models[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1999, 14(3): 836-842.
- [6] DONE Lei, ZHANG Chuancheng, YANG Yihan, et al. Improvement of probabilistic load flow to consider network configuration uncertainties[C]//Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Wuhan, China: IEEE, 2009: 1-5.
- [7] 范荣奇, 陈金富, 段献忠, 等. 风速相关性对概率潮流计算的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 18-22.
FAN Rongqi, CHEN Jinfu, DUAN Xianzhong, et al. Impact of wind speed correlation on probabilistic load flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 18-22.
- [8] XIE Kaigui, BILLINTON R. Considering wind speed correlation of WECS in reliability evaluation using the time-shifting technique[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(4): 687-693.

- [9] MIAO Lu, ZHAO Yangdong, SAHA T K. A probabilistic load flow method considering transmission network contingency[C]//Power Engineering Society General Meeting. Tampa, FL, USA: IEEE Power & Energy Society, 2007: 1-6.
- [10] LIU P L, der KIUREGHIAN A. Multivariate distribution models with prescribed marginals and covariances[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 1986, 1(2): 105-112.
- [11] 吕大刚. 基于线性化Nataf变换的一次可靠度方法[J]. 工程力学, 2007, 24(5): 79-86.
LÜ Dagang. First order reliability method based on linearized Nataf transformation[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(5): 79-86.
- [12] 张怡芳, 张步涵, 李俊芳, 等. 考虑电网静态安全风险的随机潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 59-64.
ZHANG Yifang, ZHANG Buhuan, LI Junfang, et al. Probabilistic load flow algorithm considering static security risk of the power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 59-64.
- [13] CHEN Z. Ranked set sampling: its essence and some new applications[J]. Environ Ecol Stat, 2007(14): 355-363.
- [14] ZHENG Gang, MOHAMMAD F. Modified maximum likelihood estimators based on ranked set samples[J]. Ann Inst Statist Math, 2002, 54(3): 641-658.
- [15] 陈金富, 陈海焱, 段献忠. 含大型风电场的电力系统多时段动态优化潮流[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 31-35.
CHEN Jinfu, CHEN Haiyan, DUAN Xianzhong. Multi-period dynamic optimal power flow in wind power integrated system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 31-35.

作者简介:



张里

张里(1985—),男,四川通江人,博士研究生,研究方向为风电节能调度(E-mail: lizhang_1985@163.com);

刘俊勇(1963—),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统分析及电力市场等;

刘友波(1983—),男,四川成都人,讲师,博士,研究方向为电力市场、电力系统经济运行。

Static security risk assessment of power system considering wind speed correlation

ZHANG Li, LIU Junyong, LIU Youbo, YAN Zhanxin, XU Lixiong, WU Yang

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Since multiple wind farms in a power grid are relatively close to each other, their wind speeds have obvious correlation, which has impact on the results of probabilistic load flow. Nataf transform is applied to build the sample space of wind speed correlation among multiple wind farms and the output power of wind farm with correlation is obtained. The anticipated accident set is constructed based on the present operating state of power system with wind speed correlation and the total probability theory is combined with the probabilistic load flow based on the ranked-set sampling to calculate the stochastic load flow of power system with wind speed correlation and assess its security risk. The results of RSMCS (Ranked Set Monte Carlo Simulation) for the improved IEEE 30-bus system with wind power show that, the proposed method can correctly and quickly assess the static security risk of present operating state of power system with wind speed correlation.

Key words: wind power; probabilistic load flow; Nataf transform; ranked-set sampling; wind speed correlation; risk assessment; static security