

基于Cornish-Fisher级数和半不变量法的含光伏 配电系统风险评估

陈朝宽,张靖,何宇,方裕,曾希哲,梁龙基

(贵州大学电气工程学院,贵州贵阳550025)

摘要:为准确高效地对含光伏配电系统进行风险评估,提出基于Cornish-Fisher级数的半不变量法求解含光伏配电系统的随机潮流,建立系统级的电压越限风险指标和潮流越限风险指标,分析含光伏配电系统的薄弱点,并准确揭示其风险,半不变量法保证了随机潮流计算的高效性,Cornish-Fisher级数展开提高了非正态分布下曲线拟合的精度。MATLAB算例仿真验证了所提算法对含光伏配电系统风险评估的高效性和准确性。

关键词:分布式光伏;半不变量法;Cornish-Fisher级数;随机潮流;风险评估

中图分类号:TM 711;TM 615

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202011026

0 引言

分布式光伏接入电力系统改变了电力系统的结构,传统的确定性潮流计算不能准确分析其运行情况,且光伏发电出力的随机性增大了电力系统运行风险的概率。因此,如何准确高效地对含光伏配电系统进行风险评估成为亟需解决的问题。

目前,对含分布式电源配电系统风险评估的研究主要是对各风险评估指标进行计算分析,其风险评估指标分为2类。一类是并网型风险评估指标,以电压越限风险指标和潮流越限风险指标为主,如:文献[1]建立节点电压置信区间越限的风险指标,对光伏渗透率逐渐增加的系统进行风险评估;文献[2]应用随机潮流计算线路过载的概率,建立支路潮流过载风险指标,对产生连锁故障的电力系统进行风险评估。另一类是孤网型风险评估指标,以失负荷风险指标和风光浪费风险指标为主,如:文献[3]在风功率预测不足的情况下建立缺电量风险指标和失负荷风险指标,以保证重要用户的正常运行;文献[4]建立失负荷风险指标和风光浪费风险指标,以保证孤岛运行下微电网的经济可靠运行。由于本文是对含光伏配电系统进行风险评估研究,主要研究内容为评估不同光伏容量接入系统后产生的风险,因此本文采用并网型风险指标,建立系统级的电压越限风险指标和潮流越限风险指标。

随机潮流是风险评估的基础,其可以快速准确地计算系统节点电压、支路潮流的期望、方差等数字特征,分析系统电压、潮流的概率密度函数和累积分

布函数以及含分布式电源配电系统的薄弱点,并揭示其风险^[5]。如何保证随机潮流计算结果的高效性和准确性成为风险评估的研究重点。

Borkowska B教授在1974年率先提出随机潮流的概念^[6],随后学者将随机潮流主要分为模拟法、近似法和解析法3类。

模拟法以蒙特卡罗模拟MCS(Monte Carlo Simulation)法为代表,MCS法通过随机抽样和反复确定性计算来模拟计算概率问题^[7]。文献[8]采用传统MCS法进行随机潮流计算,虽然其计算结果精确,但由于需要对大量采样数据进行分析,计算时间相对较长;文献[9]采用基于前后搜寻扫描的MCS法,根据每次仿真得到的确定性数据重构概率解,减少了采集的数据信息,缩短了计算时间;文献[10]采用拉丁超立方抽样法结合MCS法进行随机潮流计算,对样本空间进行处理,减少了采样量,提高了样本覆盖率,在保证原有精度的情形下缩短了采样时间。虽然上述方法对计算效率有所提高,但是计算时间过长仍是MCS法应用的最大问题。

近似法以点估计法PEM(Point Estimation Method)为代表,PEM是利用输入随机变量的数字特征近似描述系统状态变量统计特性的方法^[11]。文献[11-13]采用PEM进行随机潮流计算。PEM应用于小规模分布式电源并网的随机潮流计算时,其计算精度和计算效率都相对较高,但应用于系统大规模随机潮流计算时,由于获取复杂函数的高阶矩非常困难,且需要对大规模的随机变量进行点估计,其计算精度和计算效率都会相应降低。

解析法以半不变量法CM(Cumulant Method)为代表,CM通过较少次的运算求出支路潮流和节点电压的期望、方差和分布函数等信息,快速给出系统状态变量的分布^[14]。文献[14-16]采用CM对含分布式电源的配电系统进行随机潮流计算。CM计算精度

收稿日期:2020-02-03;修回日期:2020-09-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51867005);贵州省科技计划项目([2018]5781)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51867005) and the Science and Technology Plan Program of Guizhou Province ([2018]5781)

优于近似法,计算效率优于MCS法^[5]。在计算出随机变量的各阶半不变量后,需要保证其拟合曲线的精度。级数展开法是一种求取概率密度函数或概率分布函数的近似方法,不同级数展开下CM的计算准确度有所差异。在输入随机变量服从正态分布时,Gram-Charlier级数展开法的计算精度较高,但是在含光伏配电系统中,其输入随机变量并不完全服从正态分布,导致Gram-Charlier级数展开法计算精度降低。而Cornish-Fisher级数展开法计算精度不受输入随机变量分布函数的影响^[17]。

综上,本文考虑含光伏配电系统的随机特性,提出基于Cornish-Fisher级数展开的CM对含光伏配电系统进行潮流计算,定量计算系统的电压越限风险指标和潮流越限风险指标,以此评估负荷波动和不同容量光伏接入下系统运行风险,并通过MATLAB算例仿真验证了所提算法对含光伏配电系统风险评估的高效性和准确性。

1 基于CM的随机潮流计算

1.1 CM

基于CM的随机潮流计算是分析含光伏配电系统风险评估的基础。首先需要将交流潮流线性化,然后通过灵敏度矩阵将系统状态变量(节点电压、支路功率)表示为节点注入功率变量的线性和,利用半不变量的性质代替卷积运算,最终计算出状态变量的概率密度函数。

将系统的潮流方程表示为:

$$S = \begin{bmatrix} S_p \\ S_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_p(V) \\ f_q(V) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, S 为节点的注入功率向量,包括有功功率向量 S_p 与无功功率向量 S_q ; V 为节点电压向量; $f_p(V)$ 为有功功率潮流方程; $f_q(V)$ 为无功功率潮流方程。

同理,将系统的支路功率方程表示为:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_p \\ Z_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_p(V) \\ h_q(V) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, Z 为支路功率向量,包括有功功率向量 Z_p 与无功功率向量 Z_q ; $h_p(V)$ 为支路有功功率方程; $h_q(V)$ 为支路无功功率方程。

式(1)和式(2)都是线性表达式,利用半不变量性质代替卷积计算,便可求出待求变量节点电压和支路功率的 k 阶半不变量^[18],即:

$$\Delta V_{(k)} = \left(J_0^{-1}(i, j) \right)^k \Delta S_{(k)} \quad (3)$$

$$\Delta Z_{(k)} = \left(T_0(i, j) \right)^k \Delta S_{(k)} \quad (4)$$

其中, $\Delta V_{(k)}$ 、 $\Delta Z_{(k)}$ 分别为节点电压和支路功率的 k 阶半不变量; $\Delta S_{(k)}$ 为节点注入功率的 k 阶半不变量; $J_0^{-1}(i, j)$ 、 $T_0(i, j)$ 分别为灵敏度矩阵 J_0^{-1} 、 T_0 的第 i 行第

j 列元素。

1.2 Gram-Charlier级数与Cornish-Fisher级数

(1) Gram-Charlier级数。

由Gram-Charlier级数展开公式可知其概率密度函数为^[15]:

$$f(x) = \varphi(x) - C_3 \varphi^{(3)}(x) + C_4 \varphi^{(4)}(x) - C_5 \varphi^{(5)}(x) + (C_6 + 10C_3^2) \varphi^{(6)}(x) - (C_7 + 35C_3C_4) \varphi^{(7)}(x) + (C_8 + 56C_3C_5 + 35C_4^2) \varphi^{(8)}(x) + \dots \quad (5)$$

其中, $\varphi(x)$ 为标准正态分布的概率密度函数; $\varphi^{(q)}(x)$ 表示 $\varphi(x)$ 的 q 阶求导结果; C_o 为随机变量 x 的 o 阶半不变量。

(2) Cornish-Fisher级数。

由Cornish-Fisher级数展开公式可知其概率密度函数为^[12]:

$$f(m) = \varphi(m) + \frac{1}{6}(\varphi^2(m) - 1)K_3 + \frac{1}{24}(\varphi^3(m) - 3\varphi(m))K_4 - \frac{1}{36}(2\varphi^3(m) - 5\varphi(m))K_5^2 + \frac{1}{120}(\varphi^4(m) - 6\varphi^2(m) + 3)K_5 + \dots \quad (6)$$

其中, K_n 为随机变量 m 的 n 阶半不变量。

级数展开的方式不同,对输出随机变量概率分布的拟合精度也有所差异。Gram-Charlier级数展开基于中心极限定理,当输入随机变量是非正态分布时,其拟合精度会有所降低;而Cornish-Fisher级数展开的基本思想是根据选定累积分布函数的分位数求取待求累积分布函数的分位数,进而得到待求变量的累积分布函数,因此,Cornish-Fisher级数展开在输入随机变量服从非正态分布时,其拟合精度也不受影响^[17]。

1.3 含光伏配电系统元件随机模型

(1) 光伏出力随机模型。

光伏出力服从Beta分布^[8]:

$$P = rA\eta \quad (7)$$

$$P_{\max} = r_{\max}A\eta \quad (8)$$

$$f(P) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{P}{P_{\max}} \right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P}{P_{\max}} \right)^{\beta-1} \quad (9)$$

其中, P 、 $P_{\max}$ 分别为光伏发电的实际输出功率和最大输出功率; r 、 $r_{\max}$ 分别为实际光照强度与最大光照强度; A 为光伏阵列面积; η 为光伏发电转换效率; $\Gamma(\cdot)$ 为伽玛函数; α 、 β 为Beta分布的形状参数。

光伏接入配电系统时,并网逆变器保证其输出功率的功率因数为1,因此,在本文的随机潮流计

算中,将光伏接入节点看作是无功出力为0的PQ节点。

(2)负荷随机模型。

本文认为连续型负荷随机模型符合正态分布特征^[7]:

$$f(P_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} e^{-\frac{(P_i - \mu_p)^2}{2\sigma_p^2}} \quad (10)$$

$$f(Q_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_q} e^{-\frac{(Q_i - \mu_q)^2}{2\sigma_q^2}} \quad (11)$$

其中, $f(P_i)$ 、 $f(Q_i)$ 分别为随机负荷的有功功率和无功功率概率密度函数; μ_p 、 σ_p^2 和 μ_q 、 σ_q^2 分别为负荷有功功率和无功功率的期望、方差。

1.4 基于CM的随机潮流计算流程

基于CM的随机潮流计算步骤为:

(1)输入含光伏配电系统随机潮流计算所需的节点注入功率的分布函数,包括光伏出力的概率分布数据以及负荷的期望和方差;

(2)根据式(9)~(11)建立的光伏概率模型及负荷概率模型,分别计算出光伏及负荷各节点注入功率的各阶半不变量;

(3)将步骤(2)计算出的各阶半不变量进行叠加求和,计算注入功率的各阶半不变量;

(4)使用牛顿-拉夫逊法得到的节点电压、支路潮流的基准期望向量计算灵敏度矩阵;

(5)分别根据式(3)和式(4)计算节点电压和支路功率的各阶半不变量;

(6)根据式(6)所示的Cornish-Fisher级数展开得到节点电压及支路潮流的概率密度函数。

2 含光伏配电系统的风险评估

2.1 风险评估指标

风险指事故发生的概率与事故引起后果严重度的乘积。类似文献[19]建立的节点电压越限风险指标和支路潮流越限风险指标,本文采用基于Cornish-Fisher级数展开的CM得到系统电压和潮流的概率密度函数,用效用理论^[20]偏好型函数结合越限偏移量表示严重度函数,定量计算系统级的电压越限风险指标和潮流越限风险指标,以高效准确地对含光伏配电系统进行风险评估。

(1)电压越限风险指标。

根据定义可知,系统级的电压越限风险指标为:

$$R_V = \sum_{i=1}^a \int_{1.05}^{\infty} f(\bar{V}_i) g(\bar{V}_i) d\bar{V}_i + \sum_{j=1}^b \int_0^{0.95} f(\underline{V}_j) g(\underline{V}_j) d\underline{V}_j \quad (12)$$

其中, $\bar{V}_i$ 为节点 i 电压越上限的实际电压值; $\underline{V}_j$ 为

节点 j 电压越下限的实际电压值; $f(\bar{V}_i)$ 为节点 i 电压越上限的概率密度函数; $f(\underline{V}_j)$ 为节点 j 电压越下限的概率密度函数; $g(\bar{V}_i)$ 为节点 i 电压越上限的严重度函数; $g(\underline{V}_j)$ 为节点 j 电压越下限的严重度函数; a 为电压越上限的节点数; b 为电压越下限的节点数。

电压越限严重度函数采用效用理论偏好型效用函数结合越限偏移量表示:

$$g(\bar{V}_i) = \frac{e^{S_{ev}(\bar{V}_i)} - 1}{e - 1} \quad (13)$$

$$g(\underline{V}_j) = \frac{e^{S_{ev}(\underline{V}_j)} - 1}{e - 1} \quad (14)$$

电压偏移量 $S_{ev}(\bar{V}_i)$ 、 $S_{ev}(\underline{V}_j)$ 计算公式如下:

$$S_{ev}(\bar{V}_i) = \begin{cases} \frac{\bar{V}_i - V_i}{V_i} & \bar{V}_i > V_i \\ 0 & \bar{V}_i \leq V_i \end{cases} \quad (15)$$

$$S_{ev}(\underline{V}_j) = \begin{cases} \frac{V_j - \underline{V}_j}{V_j} & \underline{V}_j < V_j \\ 0 & \underline{V}_j \geq V_j \end{cases} \quad (16)$$

其中, V_i 、 V_j 分别为电压上、下限基准值。

(2)潮流越限风险指标。

根据定义可知,系统级的潮流越限风险指标为:

$$R_S = \sum_{i,j} \int_{1.3}^{\infty} f(\bar{S}_{ij}) g(\bar{S}_{ij}) d\bar{S}_{ij} \quad (17)$$

其中, $\bar{S}_{ij}$ 为支路 ij 潮流越限的实际潮流值; $f(\bar{S}_{ij})$ 为支路 ij 潮流越限的概率密度函数; $g(\bar{S}_{ij})$ 为支路 ij 潮流越限的严重度函数。

潮流越限严重度函数采用效用理论偏好型效用函数结合越限偏移量表示:

$$g(\bar{S}_{ij}) = \frac{e^{S_{ev}(\bar{S}_{ij})} - 1}{e - 1} \quad (18)$$

有功功率偏移量 $S_{ev}(\bar{S}_{ij})$ 计算公式为:

$$S_{ev}(\bar{S}_{ij}) = \frac{\bar{S}_{ij} - S_{ij}}{S_{ij}} \quad (19)$$

其中, S_{ij} 为支路 ij 的基准潮流值。

2.2 风险评估流程

风险评估流程为:

(1)采用基于Cornish-Fisher级数展开的CM计算得到节点电压和支路潮流概率密度函数;

(2)利用效用理论偏好型函数结合越限偏移量表示节点电压越限和支路潮流越限的严重度函数;

(3)根据步骤(1)所得的概率密度函数与步骤(2)所得的严重度函数建立电压越限风险指标和潮流越限风险指标。

3 算例分析

本文选取 Gram-Charlier 级数展开的 CM 随机潮流算法(记为方法 1)与 MCS 法(记为方法 2)作为对比,验证 Cornish-Fisher 级数展开的 CM 随机潮流算法(记为方法 3)应用于含光伏配电系统风险评估研究的高效性和准确性。

以 IEEE 33 节点系统为例,参数详见文献[21]。负荷服从正态分布,节点负荷期望值为 IEEE 33 节点标准系统负荷值,负荷标准差取 10%;Beta 分布的形状参数为 $\alpha=0.45$ 、 $\beta=9.19$;最大光照强度为 $r_{\max}=1.13 \text{ kW/m}^2$;光伏转换效率为 $\eta=0.13$ 。将光伏接入节点 33,接入的光伏容量分别取 200、500、1 000 kW,计算不同光伏接入容量下的系统电压越限风险指标和潮流越限风险指标。

3.1 电压越限风险指标

本文设置的允许电压波动,即正常电压区间为 $[0.95, 1.05]$ p.u.。1 000 kW 光伏接入系统的电压越限风险评估如图 1 所示(图中电压为标幺值)。

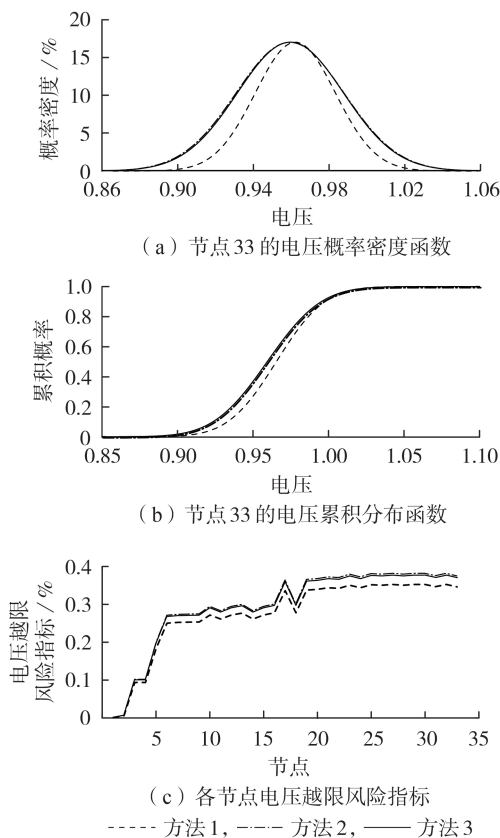


图1 1 000 kW 光伏接入下系统电压越限风险评估

Fig.1 Risk assessment of system voltage exceeding limit with integration of 1 000 kW photovoltaic

仅负荷波动以及 200、500 kW 光伏接入下系统电压越限风险评估分别如附录中图 A1—A3 所示。结合图 1 以及图 A1—A3 中本文算法的结果可见:随着接入光伏容量的增加,节点电压区间会随之增

大,当仅系统负荷波动时,节点 33 电压区间下限为 0.952 p.u.,而当系统中接入 1 000 kW 光伏时,节点 33 电压区间下限下降至 0.88 p.u.,电压区间上限也从仅负荷波动时的 0.965 5 p.u. 上升至 1 000 kW 光伏接入时的 1.045 p.u.,这说明光伏容量的增加增大了电压波动的可能性;随着光伏接入容量的增加,电压越限风险指标变大,仅负荷波动时系统的电压越限风险指标约为 1.25%,而当光伏接入容量为 1 000 kW 时,系统的电压越限风险指标约上升至 11.09%,同时,电压越限的节点也从仅负荷波动时的 16 个增至 1 000 kW 光伏接入时的 32 个。

对比分析 3 种方法的结果可知, Gram-Charlier 级数展开的 CM 随机潮流算法计算精度明显不如 MCS 法与 Cornish-Fisher 级数展开的 CM 随机潮流算法;同时在 MATLAB 平台进行仿真时发现 MCS 法计算时间为 32 s,而 Cornish-Fisher 级数展开的 CM 随机潮流算法的计算时间仅为 1.7 s。由此验证了本文算法的高效性和准确性。

3.2 潮流越限风险指标

本文设置的有功功率上限值为正常值的 1.3 倍。不同容量光伏接入下的系统潮流越限风险评估如表 1 所示。

表1 不同容量光伏接入下系统潮流越限风险评估

Table 1 Risk assessment of system power flow exceeding limit under access of photovoltaic with different capacities

光伏接入容量 / kW	方法	越限概率 / %	严重程度 / %	越限风险指标 / %
0	1	3.164	6.455	0.204 2
	2	3.167	6.464	0.204 7
	3	3.166	6.459	0.204 5
200	1	7.498	10.982	0.823 4
	2	11.512	13.487	1.552 6
	3	11.503	13.479	1.550 5
500	1	11.452	14.261	1.633 2
	2	14.406	17.955	2.586 6
	3	14.398	17.946	2.583 9
1 000	1	15.047	17.554	2.641 4
	2	18.753	21.164	3.968 9
	3	18.749	21.157	3.966 7

由表 1 可知,随着光伏接入容量的增加,系统的潮流越限风险指标也随之增大。采用本文算法时,仅负荷波动(即光伏接入容量为 0)时系统的潮流越限风险指标为 0.204 5%,而当光伏接入容量为 1 000 kW 时,系统的潮流越限风险指标上升至 3.966 7%。同时,对比分析潮流越限风险指标与电压越限风险指标可知,在不同容量光伏接入情形下,电压越限风险指标均大于潮流越限风险指标,因此,电压波动明显更受光伏接入的影响。

同理,3 种方法的结果对比验证了本文算法用于含光伏配电系统潮流越限风险评估研究的高效性和准确性。

4 结论

本文提出基于Cornish-Fisher级数展开的CM对含光伏配电系统进行随机潮流计算,建立系统级的电压越限风险指标和潮流越限风险指标,对随机负荷波动和不同容量光伏接入下的配电系统进行风险评估研究。所得结论如下。

(1)基于随机潮流计算,建立系统级的电压越限风险指标和潮流越限风险指标,可以更全面地评估光伏接入后配电系统的运行风险。

(2)当系统中仅有负荷波动时,输入随机变量服从正态分布,基于Gram-Charlier级数展开的CM随机潮流算法与本文方法计算精度近似。但当有光伏接入后,输入随机变量服从非正态分布,本文方法的计算精度明显更高。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 杨夏,羿应棋,陶飞达,等. 考虑DG随机性的配电网电压质量概率评估方法[J]. 机电工程技术,2018,47(4):131-136.
YANG Xia,YI Yingqi,TAO Feida,et al. Probability evaluation method of voltage quality in distribution network considering DG randomness[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology,2018,47(4):131-136.
- [2] 徐迪,王洪涛. 基于随机潮流和风险价值的含大规模风电系统高风险连锁故障评估[J]. 电网技术,2019,43(2):400-409.
XU Di,WANG Hongtao. High risk cascading outage assessment in power systems with large-scale wind power based on stochastic power flow and value at risk[J]. Power System Technology,2019,43(2):400-409.
- [3] 付兵彬,万小花,熊小伏,等. 基于风速时间周期特征的风电并网系统风险评估方法[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(19):43-50.
FU Bingbin,WAN Xiaohua,XIONG Xiaofu,et al. Risk assessment of wind power integrated system based on time-periodic characteristics of wind speed[J]. Power System Protection and Control,2018,46(19):43-50.
- [4] 罗毅,刘明亮. 计及风险备用约束的孤网系统环保经济调度[J]. 电网技术,2013,37(10):2705-2711.
LUO Yi,LIU Mingliang. Research on environmental and economic dispatch for isolated microgrid system taken risk reserve constraints into account[J]. Power System Technology,2013,37(10):2705-2711.
- [5] 刘宇,高山,杨胜春,等. 电力系统概率潮流算法综述[J]. 电力系统自动化,2014,38(23):127-135.
LIU YU,GAO Shan,YANG Shengchun,et al. Review on algorithms for probabilistic loadflow in power system[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(23):127-135.
- [6] XIAO Q,ZHOU S W. Probabilistic power flow computation considering correlated wind speeds[J]. Applied Energy,2018,231:677-685.
- [7] ZHANG J,XIONG G J,MENG K,et al. An improved probabilistic load flow simulation method considering correlated stochastic variables[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2019,111:260-268.
- [8] 乐健,朱江峰,孙旻,等. 大规模分布式光伏接入的配网风险评估及应对措施研究[J]. 电测与仪表,2019,56(14):28-33.
LE Jian,ZHU Jiangfeng,SUN Min,et al. Research on the risk assessment and countermeasures of distribution network with large scale distributed PV accessing[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2019,56(14):28-33.
- [9] GUPTA A R,KUMAR A. Comparison of deterministic and probabilistic radial distribution systems load flow[J]. Journal of the Institution of Engineers (India): Series B,2017,98(6):547-556.
- [10] 张建波,张忠伟,杨洋. 改进拉丁超立方蒙特卡洛模拟[J]. 吉林大学学报(信息科学版),2018,36(4):452-458.
ZHANG Jianbo,ZHANG Zhongwei,YANG Yang. Improvement of application of Latin hypercube Monte Carlo simulation[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition),2018,36(4):452-458.
- [11] 张衡,程浩忠,柳璐,等. 基于点估计法随机潮流的输电网多阶段规划研究[J]. 电网技术,2018,42(10):3204-3210.
ZHANG Heng,CHENG Haozhong,LIU Lu,et al. Research on multistage transmission network expansion planning using point estimation method based on stochastic power flow[J]. Power System Technology,2018,42(10):3204-3210.
- [12] 叶莘,韦钢,周利骏,等. 含分布式电源配电网供电能力的概率评估[J]. 电力系统及其自动化学报,2019,31(4):99-105.
YE Shen,WEI Gang,ZHOU Lijun,et al. Probabilistic evaluation on power supply capability of distribution system with distributed generations[J]. Proceedings of the CSU-EPSS,2019,31(4):99-105.
- [13] 车玉龙,吕晓琴,王晓茹,等. 含非正态分布概率潮流计算的改进型两点估计法[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):128-133.
CHE Yulong,LÜ Xiaojin,WANG Xiaoru,et al. Improved two point estimation method for probabilistic power flow calculation with non-normal distribution[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(12):128-133.
- [14] 廖星星,吴奕,卫志农,等. 基于GMM及多点线性半不变量法的电-热互联综合能源系统概率潮流分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):55-62.
LIAO Xingxing,WU Yi,WEI Zhinong,et al. Probabilistic power flow analysis of integrated electricity-heat energy system based on GMM and multi-point linear cumulant method[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(8):55-62.
- [15] 毛晓明,叶嘉俊. 奇异值分解结合均匀设计采样的半不变量法概率潮流计算[J]. 电力自动化设备,2019,39(6):159-165,172.
MAO Xiaoming,YE Jiajun. Probabilistic load flow calculation based on cumulant method combining singular value decomposition and uniform design sampling[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(6):159-165,172.
- [16] 黄煜,徐青山,卞海红,等. 基于拉丁超立方采样技术的半不变量法随机潮流计算[J]. 电力自动化设备,2016,36(11):112-119.
HUANG Yu,XU Qingshan,BIAN Haihong,et al. Cumulant method based on Latin hypercube sampling for calculating probabilistic power flow[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(11):112-119.
- [17] 郭效军,蔡德福. 不同级数展开的半不变量法概率潮流计算比较分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(12):85-90,110.
GUO Xiaojun,CAI Defu. Comparison of probabilistic load flow calculation based on cumulant method among different series expansions[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(12):85-90,110.
- [18] 熊飞,董蓓蓓,李更丰. 含间歇性分布式电源的配电系统风险评估[J]. 电力系统自动化,2016,40(12):62-67.
XIONG Fei,DONG Beibei,LI Gengfeng. Risk evaluation of distribution system with stochastic distributed generator[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(12):62-67.

- [19] 金楚,黎嘉明,徐沈智,等. 大规模光伏发电并网概率潮流计算及对电网的影响[J]. 电力工程技术,2017,36(1):1-8.
JIN Chu,LI Jianming,XU Shenzhi,et al. Probabilistic load flow calculation and influence analysis for power grid connected with large scale photovoltaic generation system[J]. Electric Power Engineering Technology,2017,36(1):1-8.
- [20] 马倩,王昭聪,潘学萍,等. 新电改环境下基于效用函数的电网投资决策评价方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):198-204.
MA Qian,WANG Zhaocong,PAN Xueping,et al. Evaluation method of power grid investment decision based on utility function under new electricity reform environment[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(12):198-204.
- [21] BARAN M E,WU F F. Network reconfiguration in distribu-

tion systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1989(4):1401-1407.

作者简介:



陈朝宽

陈朝宽(1993—),男,贵州安顺人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统风险评估(E-mail:1004734620@qq.com);

张靖(1979—),男,贵州普定人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统稳定运行与控制(E-mail:zhangjing@gzu.edu.cn)。

(编辑 王锦秀)

Risk assessment of distribution system with photovoltaic based on Cornish-Fisher series and cumulant method

CHEN Chaokuan,ZHANG Jing,HE Yu,FANG Yu,ZENG Xixi,LIANG Longji

(School of Electrical Engineering,Guizhou University,Guiyang 550025,China)

Abstract: In order to carry out risk assessment of distribution system with photovoltaic accurately and effectively,a cumulant method based on Cornish-Fisher series is proposed to solve the stochastic power flow of distribution system with photovoltaic. The risk indicator of voltage exceeding limit and power flow exceeding limit at system level are established,and the weak points of distribution system with photovoltaic are analyzed to reveal its risk accurately. The cumulant method ensures the high efficiency of stochastic power flow calculation,and the Cornish-Fisher series expansion improves the accuracy of curve fitting under non-normal distribution. The effectiveness and accuracy of the proposed algorithm for risk assessment of distribution system with photovoltaic are verified by MATLAB case simulation.

Key words: distributed photovoltaic;cumulant method;Cornish-Fisher series;stochastic power flow;risk assessment

(上接第62页 continued from page 62)

Method for time-varying optimal power flow tracking of doubly-fed wind turbine grid-connected system

LI Lulu,HAN Xueshan,ZHU Xingxu,LI Keqiang

(Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control,Ministry of Education, Shandong University,Jinan 250061,China)

Abstract: Aiming at the problem that the voltage coordinated control optimization speed of PCC(Point of Common Coupling) and internal nodes of wind power system is hard to catch up with the uncertainty of wind power,a model for time-varying optimal power flow tracking of doubly-fed wind turbine grid-connected system is established,and the online fast solving method of the model is proposed. Based on the real-time measurement and communication technology to make the wind power system observable,the model and solving method focus on the characteristics of minute state variables of wind power system in extremely short optimization period,linearize the model by retaining the first order term of Taylor expansion to obtain the time-varying linearized optimal model,which realize the millisecond level solution of the model,moreover pursuit the optimal power flow state of wind power system in real time. The time-varying regulation range between active and reactive power of doubly-fed induction generator is used to coordinate the output of active and reactive power of each unit,so as to dig the potential of rapid regulation and control of doubly-fed induction generator under the power electronic technology. A practical calculation example of doubly-fed wind turbine grid-connected system is analyzed,the results show that the proposed method can effectively alleviate the voltage problem of PCC and internal nodes of wind power system,and realize the time-varying optimal power flow tracking of wind power system.

Key words: doubly-fed induction generation;wind power system; P - Q regulation range;time-varying optimal power flow tracking;voltage regulation

附录：

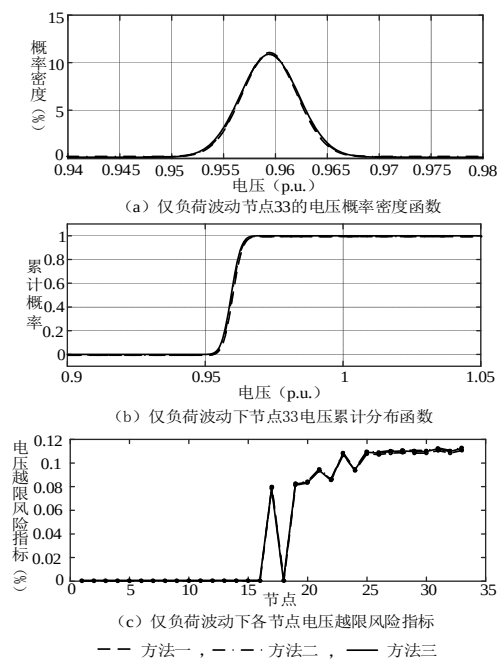


图 A1 仅负荷波动下系统电压越限风险评估

Fig.A1 Risk assessment of system voltage exceeding limit under only load fluctuation

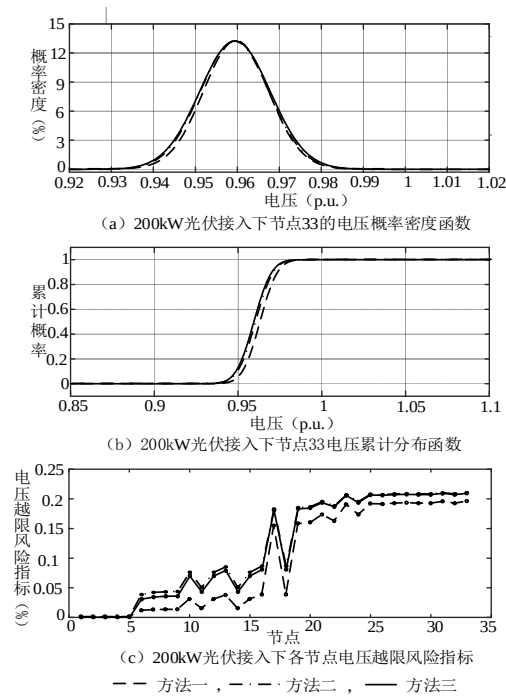


图 A2 200 kW 光伏接入下系统电压越限风险评估

Fig.A2 Risk assessment of system voltage exceeding limit under access of 200 kW photovoltaic

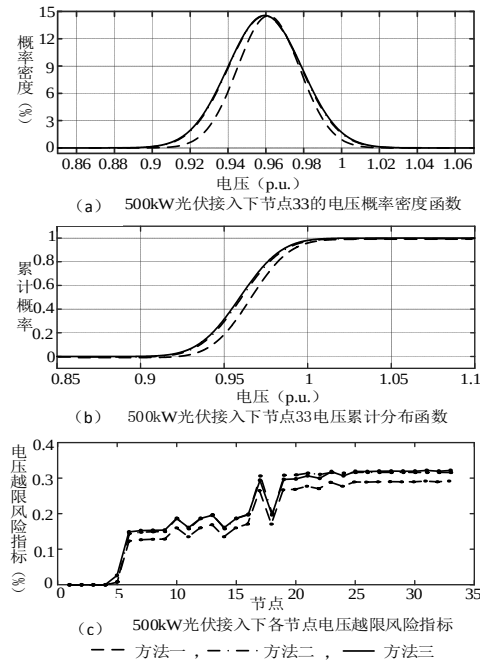


图 A3 500 kW 光伏接入下系统电压越限风险评估

Fig.A3 Risk assessment of system voltage exceeding limit under access of 500 kW photovoltaic