

基于拟蒙特卡罗模拟法的主动配电网随机潮流计算

王秀丽,张择策,侯雨伸

(西安交通大学 电气工程学院,陕西 西安 710049)

摘要: 主动配电网内分布式电源出力波动性大、负荷可调,传统的确定性模型已不再能准确地对其进行风险评估。建立主动配电网中不确定性因素的模型,采用拟蒙特卡罗(QMC)模拟法抽取 Sobol 确定性低偏差点列,以随机潮流计算为工具,对主动配电网的节点电压越限情况进行模拟。算例表明,相同抽样次数下拟蒙特卡罗法的计算结果比蒙特卡罗法更接近真解。

关键词: 随机潮流; 主动配电网; 拟蒙特卡罗; 低偏差点列

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.03.002

0 引言

面对资源环境和节能减排的双重压力,电力工业亟待低碳转型。主动配电网有机整合先进信息通信、电力电子及智能控制等技术,为实现分布式可再生能源大规模并网与高效利用提供了一种有效的解决方案,对支撑低碳经济发展具有重要战略意义^[1]。它将引领我国智能配电网领域的发展方向,具有巨大的经济效益和社会效益。文献[2]重点研究了主动配电网的定义及其特征,分析了主动配电网的研究现状及其关键技术。文献[3-4]叙述了主动配电网在兼容大规模间歇式可再生能源问题中的作用。主动配电网对于优化一次能源结构、提升绿色能源利用率有着重要的意义^[5]。

主动配电网的实现意味着其系统状态更加复杂多变,其风险评估变得更加困难。随机潮流是实现系统安全分析向概率性准则方向发展、实现综合考虑各种不确定因素评估系统稳态运行特性的有效分析工具^[6]。随机潮流最早由 Borkowska B 提出^[7],其研究的根本问题是:在系统运行条件随机变化下,求解系统潮流的概率分布及相关统计参数。文献[8-11]阐述了随机潮流的各类计算模型,其中以线性交流模型的应用较为广泛。

随机潮流的计算方法大致可分为近似法^[12]、解析法^[13]和模拟法^[14] 3 类。文献[14]中的研究表明模拟法在处理较大规模随机因素和复杂状态时具有一定优势。蒙特卡罗 MC(Monte Carlo)模拟法是应用最为广泛的抽样方法^[15-17],然而其计算量大是一个明显的缺点。近年来,在经济学领域中的证券交易^[18]、期权问题^[19]中较为有效的拟蒙特卡罗 QMC(Quasi-Monte Carlo)模拟法逐渐在电力系统的工程背景下得到应用。QMC 法抽样均匀,从改进误差阶的角度

提高了 MC 法的计算效率^[20],文献[20]在电力系统的可靠性评估中使用 QMC 法,取得了理想的效果。

本文提出了主动配电网中各类不确定性因素的模型,采用 QMC 法抽取 Sobol 确定性低偏差点列,通过随机潮流计算模拟了主动配电网中节点电压的越限情况。本文所建立的随机模型和计算模型对深化主动配电网静态安全评估研究有一定指导作用,所采用的方法为模拟法进行状态抽样提供了新的思路。

1 主动配电网中的不确定性因素

主动配电网中的各类不确定性因素是造成其运行环境复杂多变和分析评估困难的主要原因。这些不确定性因素主要包括分布式能源出力波动和可调负荷。

1.1 分布式能源出力模型

1.1.1 光伏发电系统出力建模

在主动配电网中,中小型光伏发电系统是重要的出力来源。根据主动配电网中光伏发电系统所处的经纬度,利用 Homer 软件可以方便地得到该处全年的辐射强度,从而得到无辐射率、辐射平均值和辐射标准差。此外,光伏发电系统还受天气和温度的影响。给定损耗系数、白昼平均气温、温度系数、额定出力和装机台数,可计算光伏发电系统的对外总出力,如式(1)所示。

$$P_g = \begin{cases} 0 & \text{无辐射} \\ n_g P_{gr} f R_t [1 + \alpha(T + \sigma \cdot \text{randn} - T_{av})] & \text{有辐射} \end{cases} \quad (1)$$

其中, n_g 为光伏发电系统所含发电单元个数; P_{gr} 为光伏发电单元额定出力; R_t 为辐射强度; α 为温度系数; f 为损耗系数; T 和 T_{av} 分别为某时刻实际温度和日平均温度,为了计入对温度不确定性的考虑,在实际温度上增加一项 $\sigma \cdot \text{randn}$, σ 为温度波动的标准差,randn 为一个服从标准正态分布的随机数。

1.1.2 风电场出力建模

风能也是应用较成熟的分布式能源。根据风电场

收稿日期:2016-06-01;修回日期:2016-10-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277140)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277140)

的历史数据,首先对风速进行统计学上的分布模拟,如用威布尔分布对数据进行拟合。对于拟合出的风速分布曲线,采用模拟法抽取某时刻风速的状态,再根据状态计算整个风电场的对外等值出力。

考虑尾流效应并给定风电场的切入风速、额定风速、切出风速、额定出力、装机台数,可计算风电场的对外总出力,如式(2)和式(3)所示。

$$P_w = \begin{cases} 0 & v_w < v_{ci} \\ P_{wr} \frac{(v_w - v_{ci})^3}{(v_r - v_{ci})^3} & v_{ci} \leq v_w \leq v_r \\ P_{wr} & v_r < v_w \leq v_{co} \\ 0 & v_w > v_{co} \end{cases} \quad (2)$$
$$P_{total} = N_w c_{tail} P_w \quad (3)$$

其中, v_{ci} 为切入风速; v_{co} 为切出风速; v_r 为额定风速; P_{wr} 为单台风电机额定出力; N_w 为风电场总装机台数; c_{tail} 为尾流效应系数。

1.1.3 生物质发电出力建模

生物质能源的燃料,来源松散、易挥发、热值低^[21],一般难以收集和贮藏,限制了其规模化集中利用,但生物质发电的波动性相比风电和光伏要弱很多。因此,它可成为主动配电网中较为稳定的补充出力。以中型生物质循环流化床气化发电为例,给定额定出力、气化效率和发电效率的范围,其出力公式如(4)所示。

$$P_b = f_b f_c P_{br} \quad (4)$$

其中, P_{br} 为气化发电系统额定出力; f_b 和 f_c 分别为考虑不确定性后的发电效率和气化效率。

1.2 负荷概率模型

在主动配电网中,负荷不能统一地简单用峰值或平均值来表示,而必须计入不确定性的影响。根据文献[22],采用综合考虑预测不确定性和负荷点变化的相关性的改进 k 均值聚类算法来建立负荷的概率模型。用 Sturges 公式决定年负荷阶次的个数: $k = 1 + \lg 8760 / \lg 2 \approx 14$ 。

用改进 k 均值聚类算法对 IEEE RTS79 系统的年负荷原始数据进行聚类,得到如表 1 所示的负荷概率模型。表中不同级别的负荷水平均用峰值百分数来

表示。

1.3 需求侧响应模型

需求侧响应是主动配电网中一个显著的特点。单个用户的主动需求行为,对改善整个电网供需平衡关系没有显著的效果^[1],但整合所有资源,积少成多,就能形成对供需平衡的间接控制。本文中主要考虑的需求侧响应是电动汽车和实时电价。

电动汽车有利于节能减排,推动着电力工业转型。据统计,每天有 95% 的电动汽车实际处于停驶状态^[1],若将停驶状态的电动汽车接入配电网 V2G (Vehicle to Grid) 参与调度,则可以创造极大的经济效益和社会效益。

设某一时刻在主动配电网的范围内有 N 辆电动汽车和 M 个充电站,对第 i ($i \leq N$) 辆电动汽车用 3 个随机数 s_{vi1} 、 s_{vi2} 、 s_{vi3} 来决定其状态,其中, s_{vi1} 服从均匀分布,决定第 i 辆汽车的停(或行)驶状态,若 s_{vi1} 小于停驶概率 p_{vi1} ,则第 i 辆汽车为停驶状态,否则为行驶状态; s_{vi2} 服从均匀分布,决定第 i 辆汽车的充(或放)电状态,若 s_{vi2} 小于充电概率 p_{vi2} ,则第 i 辆汽车为充电状态,否则为放电状态; s_{vi3} 为小于 M 的随机整数,表示第 i 辆汽车在第 s_{vi3} ($s_{vi3} \leq M$) 个充电站进行充放电,即对网络中第 s_{vi3} 个节点产生影响,将充电电量视为负荷,将放电电量视为负的负荷,以调整当前网络中节点的注入功率。

电能作为一种商品,在其紧缺的时候具有更高的价值。考虑实时电价的影响,则用电高峰期,电价升高,将会引导消费者避开高峰期用电,可自动削峰填谷。设节点 x 是主动配电网中对实时电价敏感的特殊节点,若其负荷 L_x 超过给定的负荷阈值 L_0 ,则对该负荷进行人为的修正: $L_x = \lambda L_x$,其中 λ 为修正系数。

主动配电网中还存在其他随机因素的影响,如微电网的接入、储能装置和可中断负荷。但本文的研究重点不是主动配电网的精细化建模,限于篇幅,不再赘述其他不确定性因素。

2 QMC 法

2.1 QMC 法原理

QMC 法和 MC 法都是抽样的方法,它们的本质都是在描述状态的超立方体中进行大数目的抽样,再以这些抽样的平均值来估计问题的解。但 MC 法抽取的是几乎完全随机的伪随机数序列,而 QMC 法抽取的是在超立方体中分布更为均匀的确定性低偏差点列。

为描述点列的均匀性,下面说明星偏差的概念^[20]。设 $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ 是 s 维单位超立方体 $[0, 1]^s$ 中的点列,定义该点列的星偏差如式(5)所示:

表 1 基于改进 k 均值聚类算法的负荷概率模型
Table 1 Probabilistic load model based on improved k -means clustering algorithm

负荷阶次	负荷水平/%	概率	负荷阶次	负荷水平/%	概率
1	96.42	0.0026	8	70.16	0.0951
2	92.45	0.0076	9	65.73	0.1264
3	88.52	0.0220	10	61.02	0.0998
4	84.86	0.0363	11	54.92	0.1143
5	81.93	0.0461	12	49.71	0.1340
6	78.62	0.0724	13	42.70	0.1220
7	74.63	0.0710	14	35.54	0.0503

$$D_N^* = \sup_{V \subset [0,1]^s} \left| \frac{M(X_1, X_2, \dots, X_N)}{N} - \mu(V) \right| \quad (5)$$

其中, $M(X_1, X_2, \dots, X_N)$ 为点列 $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ 包含在区域 V 中的点数; $\mu(V)$ 为 $[0,1]^s$ 中区域 V 的勒贝格测度。文献[20]在单位二维空间内解释了 D_N^* 的含义。

根据文献[20]和[23],若函数 F 在 $[0,1]^s$ 上存在 Hardy and Krause 意义下的有界变差 $V(F)$,那么对于任意 $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$,有:

$$\left| \int_{[0,1]^s} F(X) dX - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F(X_i) \right| < V(F) D_N^* \quad (6)$$

由以上误差不等式可以看出,点列的星偏差越小则误差越小。文献[23]证明了 QMC 法的积分误差渐进以 $O(N^{-1})$ 为阶,即误差每提高一位精度,只需增加约 10 倍的抽样次数。而 MC 法的积分误差以 $O(N^{-1/2})$ 为阶,需要增加约 100 倍的抽样才能将精度提高一位。

2.2 Sobol 点列的构造

低偏差点列的构造是 QMC 法的关键,而 Sobol 点列是最常用的低偏差点列,构造方法也相对简单。文献[20]介绍了一维($s=1$)情况下的 Sobol 点列构造方法。对于多项式:

$$a^q + c_1 a^{q-1} + \dots + c_{q-1} a + 1 \quad c_i \in \{0,1\}; i=1,2,\dots,q-1 \quad (7)$$

该多项式能够被整除的形如 $a^q + 1$ 的阶数最小值为 $p=2^q-1$ 且该多项式不可约。通常称多项式(7)为本原多项式。此外,选择奇数 $m_1, \dots, m_q$ 使 $0 < m_j < 2^j$ 。定义方向数:

$$v_j = \frac{m_j}{2^j} = 0.v_{j,1}v_{j,2}\dots \quad (8)$$

其中, $v_{j,i}$ 为 v_j 用二进制表示的第 i 位上的数字。当 $j > q$ 时,有递推公式:

$$v_j = c_1 v_{j-1} \oplus c_2 v_{j-2} \oplus \dots \oplus c_q v_{j-q} \oplus \frac{v_{j-q}}{2^q} \quad (9)$$

其中, $\oplus$ 表示二进制按位异或运算。

通过选择 q 个奇数 m_j ,可以计算前 q 个方向数 v_j ,对于 $j > q$,有递推公式:

$$m_j = 2c_1 m_{j-1} \oplus 2^2 c_2 m_{j-2} \oplus \dots \oplus 2^q c_q m_{j-q} \oplus m_{j-q} \quad (10)$$

可得 Sobol 点列的第 n 个数:

$$r_n = b_1 v_1 \oplus b_2 v_2 \oplus b_3 v_3 \oplus \dots \quad (11)$$

其中, $\dots b_3 b_2 b_1$ 为 n 的二进制表现形式。

2.3 QMC 法随机潮流分析流程

在直角坐标下,系统潮流方程的简化表达方式为:

$$\begin{cases} \mathbf{Y} = \mathbf{g}(\mathbf{U}) \\ \mathbf{Z} = \mathbf{h}(\mathbf{U}) \end{cases} \quad (12)$$

其中, $\mathbf{Y}$ 为系统节点注入向量; $\mathbf{U}$ 为节点电压向量; $\mathbf{Z}$ 为支路有功或无功功率向量。由于注入量 $\mathbf{Y}$ 的随机变化将引起支路潮流或节点电压的随机变化,故向量 $\mathbf{U}$ 和 $\mathbf{Z}$ 为随机向量。随机潮流计算的 QMC 模型与其 MC 模型几乎完全相同,只是将决定系统运行状态的

伪随机数序列替换为 Sobol 低偏差点列。主动配电网的 QMC 法随机潮流分析流程如图 1 所示。

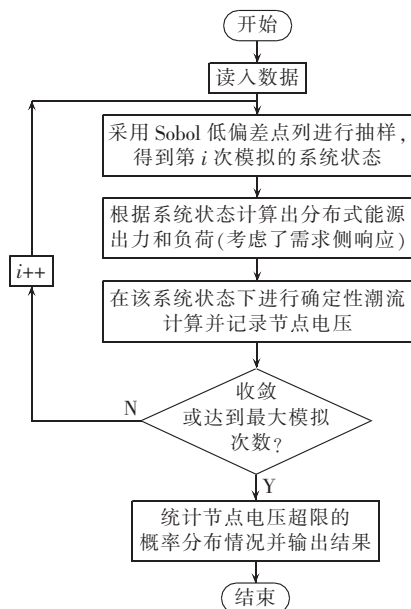


图 1 基于 QMC 法的节点电压越限评估流程图

Fig.1 Flowchart of nodal overvoltage assessment based on QMC method

确定性潮流计算以及求取节点电压越限的概率分布容易实现,限于篇幅,不再具体论述。QMC 法的收敛判据仍使用 MC 法中的方差系数。

3 算例分析

图 2 是一个在 IEEE 30 节点系统参数和网架结构的基础上改造的 35 kV/10 kV 主动配电网系统^[1]。

该系统中,连接主网的是节点 1,节点 5 和 13 连接光伏发电系统,节点 8 和 11 连接风电场,节点 2 连接生物质发电系统,节点 4、21 和 27 处有电动汽车充

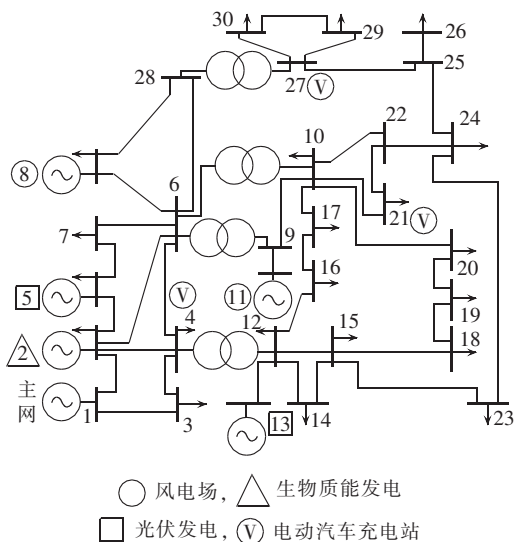


图 2 主动配电网测试系统

Fig.2 Active distribution network for test

电站。取 10 MV·A 为基准容量,10 kV 为基准电压,使用 IEEE RTS79 系统的负荷曲线,但将峰值取为 300 MW。节点 2 接入额定容量为 2 MW 的中型生物质循环流化床气化系统,平均气化效率为 0.75,发电效率范围为 0.15~0.18。光伏发电系统数据和风电场数据见表 2 和表 3。限于篇幅,其他系统参数不再罗列。

表 2 光伏发电系统数据

Table 2 Data of photovoltaic generation systems

参数	节点 5	节点 13
经度/(°)	东经 104.4	东经 104.4
纬度/(°)	北纬 30.4	北纬 30.4
损耗系数	0.85	0.75
温度系数	-0.0045	-0.0055
白昼平均气温/℃	24	24
额定出力/MW	3	4
总台数	40	30

表 3 风电场数据

Table 3 Data of wind farms

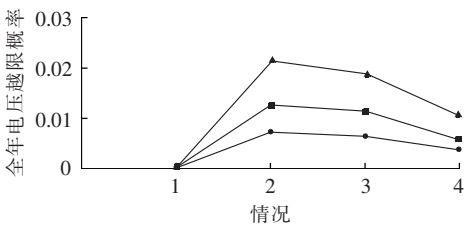
参数	节点 8	节点 11
风速期望/(m·s ⁻¹)	5	4
风速标准差/(m·s ⁻¹)	8	9
切入风速/(m·s ⁻¹)	3	4
切出风速/(m·s ⁻¹)	25	28
额定风速/(m·s ⁻¹)	13	15
额定出力/MW	1.5	2
总台数	50	30

下面考虑以下几种情况。

- a. 情况 1:主动配电网中不含任何分布式能源,但含有可调负荷。
- b. 情况 2:主动配电网中含光伏发电系统和可调负荷。
- c. 情况 3:主动配电网中含光伏发电系统、风电场和可调负荷。
- d. 情况 4:主动配电网中含光伏发电系统、风电场、生物质发电系统和可调负荷。

为不失一般性,对以上 4 种情况,均采用 QMC 法抽样 100 000 次(精度已达 0.01),以 1.05 倍的额定电压为电压上限,95% 的额定电压为电压下限。图 3 给出了部分高风险节点(节点 10、节点 17、节点 27)的全年电压越限概率随情况而变化的趋势。此外,统计了所有节点的全年电压总越限概率和全年电压总越限小时数,结果见表 4。

分析图 3 的趋势和表 4 中的数据可以发现,当主动配电网中不含分布式能源且负荷可调时,节点电压几乎不越限,而加入光伏发电系统后,电压越限概率和越限小时数变大了二三十倍,可见间歇式能源的接入将会降低系统的安全概率。但随着分布式能源的增多以及风电、生物质发电的依次接入,越限指标逐渐



—◆—节点 10, —■—节点 17, —▲—节点 27

图 3 不同情况下高风险节点的全年电压越限概率
Fig.3 Annual overvoltage probability of high-risk nodes for different cases

表 4 不同情况下的全年指标

Table 4 Annual system indices for different cases

情况	全年节点电压越限概率/%	全年电压越限小时数/h
1	0.00163	0.96
2	0.03470	19.55
3	0.02950	16.62
4	0.01570	7.41

变小,这说明多种分布式能源在主动配电网中并存是有可能提高电能质量的,且风能、光能之间可能存在的互补特性以及生物质能的弱时空特性可平衡分布式能源总体的不确定性。另外,在实际工程中可适当放松对精度的要求以减少抽样次数和节省计算时间,重要抽样或分层抽样等加快收敛的策略在 QMC 法中仍然有效。

下面结合算例说明 QMC 法相比于 MC 法的优势。在使用模拟法进行随机潮流计算的时候,主动配电网的系统状态是随机抽取的,即便抽取了大数目的状态使得满足精度要求,每次计算的结果仍然是有差别的。以情况 4 为例,分别用 MC 法和 QMC 法对全年电压越限小时数计算 5 次,并与理论上和真值极其接近的高精度收敛值(本文中取精度已达 0.005 时的计算结果)作对比,计算结果如图 4 和图 5 所示。

从图 4 和图 5 中可以看出,QMC 法和 MC 法每次的计算结果虽然都接近收敛值,但也都有所差别,且 QMC 法的计算结果波动小于 MC 法。图 6 给出了 2 种方法模拟 20 次计算得出的标准差大小。可见 QMC 法能从误差阶的角度改进模拟法的收敛特性,从而更真实、准确和稳定地反映真解。

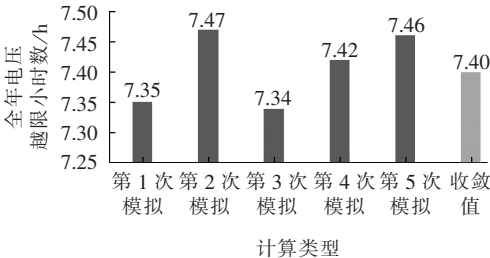


图 4 MC 法的计算结果

Fig.4 Calculative result by MC method

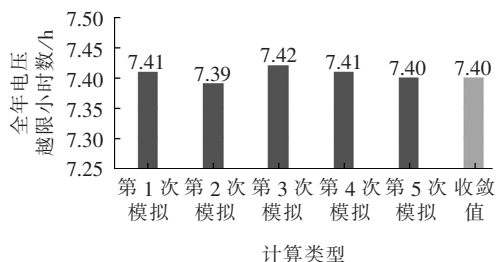


图5 QMC法的计算结果

Fig.5 Calculative result by QMC method

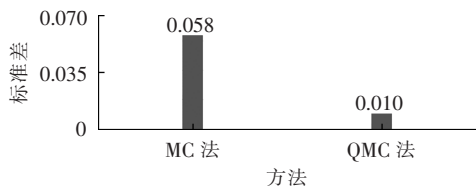


图6 2种方法的标准差对比

Fig.6 Comparison of standard deviation between two methods

QMC法的计算效率相比MC法提高更加明显,这是由于QMC法从改进误差阶的角度极大地改变了模拟法的收敛特性。

4 结论

a. 主动配电网有着网状运行、潮流双向和负荷可调节等特点,分布式能源和需求侧响应是造成系统不确定性的主要原因。而随机潮流计算引入概率理论来考虑这些不确定性因素,可免去大量常规潮流计算,提高主动配电网风险评估的效率。

b. QMC法从改进误差阶的角度,致力于抽样的均匀性,用确定性低偏差点列替代常规MC法中的伪随机数列,吸收了MC法易于实现且对维数不敏感的优点,牺牲了一定抽样随机性而使抽样更加均匀,从而有望得到更接近真解的结果。

c. 本文用基于IEEE 30节点系统的主动配电网算例,采用QMC法的Sobol点列进行抽样,实现了电压越限全年指标的求取和统计,论证了多种分布式能源在主动配电网中并存可以提高电能质量的观点。通过对同一个情况进行相同次数的重复计算,对比2种方法计算结果的波动性,证明了同样的抽样次数下,QMC法比MC法所得结果更接近真解。

d. 本文为如何考虑主动配电网中的不确定性因素提供了合理的方法,为加快模拟法抽样效率提供了新的思路,对推动可再生能源消纳技术有一定的指导作用。

参考文献:

[1] 广东电网公司电力科学研究院组编. 主动配电网知识读本[M]. 北京:中国电力出版社,2014:3-5.
[2] 尤毅,刘东,于文鹏,等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统

自动化,2012,36(18):10-16.

YOU Yi,LIU Dong,YU Wenpeng,et al. Technology and its trends of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(18):10-16.

- [3] WALLING R,SAINT R,DUGAN R C,et al. Summary of distributed resources impact on power delivery[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2008,23(3):1663-1644.
- [4] 范明天,张祖平,苏傲雪,等. 主动配电系统可行技术的研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(22):12-18.
FAN Mingtian,ZHANG Zuping,SU Aoxue,et al. Enabling technologies for active distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(22):12-18.
- [5] DJAPIC P,RAMSAY C,PUDJANTO D,et al. Taking an active approach[J]. IEEE Power and Energy Magazine,2007,5(4):68-77.
- [6] 朱星阳,刘文霞,张建华,等. 电力系统随机潮流及其安全评估应用研究综述[J]. 电工技术学报,2013,28(10):257-270.
ZHU Xingyang,LIU Wenxia,ZHANG Jianhua,et al. Reviews on power system stochastic load flow and its applications in safety evaluation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(10):257-270.
- [7] BORKOWSKA B. Probabilistic load flow[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1974,93(3):752-759.
- [8] DOPAZO J F,KLITIN O A,SASSON A M. Stochastic load flow[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1975,94(2):299-309.
- [9] SOKIERAJSKI M. A method of stochastic load flow calculation[J]. Archiv Fur Elektrotechnik,1978,60(1):37-40.
- [10] 黄进安,吴惟静. 保留潮流方程非线性的电力系统概率潮流计算[J]. 电力系统自动化,1986,10(6):3-12.
HUANG Jinan,WU Weijing. The calculation of probabilistic load flow remaining nonlinearity[J]. Automation of Electric Power Systems,1986,10(6):3-12.
- [11] 刘浩,侯博渊. 保留非线性的快速P-Q分解随机潮流分析[J]. 电力系统及其自动化学报,1996,8(1):8-17.
LIU Hao,HOU Boyuan. The analysis of probabilistic load flow retaining nonlinearity[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,1996,8(1):8-17.
- [12] ADRIGAL M M,PONNAMBALAM K,UINTANA Q V H. Probabilistic optimal power flow[C]//IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Waterloo,Canada:[s.n.],1998:385-388.
- [13] ALLAN R N,GRIGG C H,AL-SHAKARCHI M R G. Numerical techniques in probabilistic load flow problems[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering,1976,10(4):853-860.
- [14] 丁明,李生虎,黄凯. 基于蒙特卡罗模拟的概率潮流计算[J]. 电网技术,2001,25(11):10-14,22.
DING Ming,LI Shenghu,HUANG Kai. Probabilistic load flow analysis based on Monte Carlo simulation[J]. Power System Technology,2001,25(11):10-14,22.
- [15] 梁惠施,程林,刘思革. 基于蒙特卡罗模拟的含微网配电网可靠性评估[J]. 电网技术,2011,35(10):76-81.
LIANG Huishi,CHENG Lin,LIU Sige. Monte Carlo simulation based reliability evaluation of distribution system containing microgrids[J]. Power System Technology,2011,35(10):76-81.
- [16] BILLINTON R,LI W. Reliability assessment of electric power

- systems using Monte Carlo methods [M]. New York, USA: Plenum Press, 1994: 35-36.
- [17] LIEBER D, NEMIROVSKII A, RUBINSTEIN R Y. A fast Monte Carlo method for evaluating reliability indexes [J]. IEEE Transactions on Reliability, 1999, 48(3): 256-261.
- [18] BOYLE P, BROADIE M, GLASSERMAN P. Monte Carlo methods for security pricing [J]. Journal of Economic Dynamics and Control, 1997, 21(8): 1267-1321.
- [19] 董成. 拟蒙特卡罗方法在亚式期权敏感性参数估计中的应用 [D]. 北京: 清华大学, 2011.
- DONG Cheng. Quasi-Monte Carlo methods applied in sensitivities of Asian options [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [20] 侯雨伸, 王秀丽, 刘杰, 等. 基于拟蒙特卡罗方法的电力系统可靠性评估 [J]. 电网技术, 2015, 39(3): 744-750.
- HOU Yushen, WANG Xiuli, LIU Jie, et al. A quasi-Monte Carlo method based power system reliability evaluation [J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 744-750.
- [21] 吴金卓, 马琳, 林文树. 生物质发电技术和经济性研究综述 [J]. 森林工程, 2012, 28(5): 102-106.
- WU Jinzhuo, MA Lin, LIN Wenshu. Literature review on biomass power generation technology and economic feasibility [J]. Forest Engineering, 2012, 28(5): 102-106.
- [22] 陈凡, 刘海涛, 黄正, 等. 基于改进 k -均值聚类的负荷概率模型 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 128-133.
- CHEN Fan, LIU Haitao, HUANG Zheng, et al. Probabilistic load model based on improved k -means clustering algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 128-133.
- [23] NIEDERREITER H. Random number generation and quasi-Monte Carlo methods [M]. Philadelphia, USA: SIAM, 1992: 56-60.
- [24] SOBOL I M. The distribution of points in a cube and the approximate evaluation of integrals (English translation) [J]. USSR Comp Math Math Phys, 1967, 7(4): 86-112.

作者简介:



王秀丽

王秀丽 (1961—), 女, 山西河曲人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 研究方向为电力系统规划、电力市场 (E-mail: xiuliw@mail.xjtu.edu.cn);

张择策 (1992—), 男, 四川内江人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化规划、主动配电网 (E-mail: 18683209574@163.com);

侯雨伸 (1988—), 男, 陕西西安人, 博士研究生, 研究方向为电力系统可靠性。

Stochastic load flow calculation based on quasi-Monte Carlo method for active distribution network

WANG Xiuli, ZHANG Zece, HOU Yushen

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Because of the large output fluctuation of distributed generators and the adjustable loads in the active distribution network, the traditional deterministic model can be no longer used to accurately assess its risk. Models are built for the uncertain factors of active distribution network, QMC (Quasi-Monte Carlo) simulation method is adopted to select the Sobol deterministic low-discrepancy sequence, and probabilistic load flow calculation is carried out to simulate the nodal overvoltage of active distribution network. Case study shows that, with same sampling times, the calculative result by the proposed method is closer to the true solution than that by Monte Carlo method.

Key words: stochastic load flow; active distribution network; quasi-Monte Carlo; low-discrepancy sequence