

Wind Power Flow Calculation Based on Monte Carlo Method

Qingjiu Min, Zhaoxing Ma

School of Information and Control Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao Shandong
Email: 1026034983@qq.com

Received: Aug. 22nd, 2019; accepted: Sep. 3rd, 2019; published: Sep. 10th, 2019

Abstract

With the rapid development of wind energy, wind power can be integrated into the power grid on a large scale, which exacerbates the uncertainty of power system operation, making the power flow calculation of traditional power systems insufficient to adapt to many current uncertain factors. In view of this situation, this paper proposes the power flow calculation of uncertain power system based on Monte Carlo method. Firstly, based on the uncertainty characteristics of wind power, the mathematical model and probability distribution of wind power output are established, and then the wind power system with suitable power flow calculation is constructed. Secondly, according to the data sample, qualified injection nodes are found on the IEEE14 node power distribution system. Finally, the Newton-Raphson method is used to calculate the current of the system with wind power generation. The numerical results show that the method presented in this paper is more accurate in calculating the power flow of the system and can meet the engineering requirements.

Keywords

Monte Carlo Method, Wind Power, Newton-Raphson Method, Power Flow Calculation

基于蒙特卡罗方法的风电场潮流计算

闵庆久, 马兆兴

青岛理工大学信息与控制工程学院, 山东 青岛
Email: 1026034983@qq.com

收稿日期: 2019年8月22日; 录用日期: 2019年9月3日; 发布日期: 2019年9月10日

摘要

随着风能的飞速发展, 风力发电得以大规模并入电网, 其加剧了电力系统运行的不确定性, 使得传统电

力系统潮流计算不足以适应目前诸多的不确定性因素, 针对这一情况, 本文提出基于蒙特卡罗方法的不确定性电力系统潮流计算。本文首先根据风力的不确定性特征, 建立风电出力的数学模型和概率分布, 然后构建适宜潮流计算的含风电系统, 其次根据数据样本在IEEE14节点配电系统上找到合格的注入节点, 最后结合牛顿拉夫逊方法计算该系统含风力发电的潮流。数值计算结果表明本文给出的方法计算系统潮流较为准确, 能够满足工程要求。

关键词

蒙特卡罗法, 风力发电, 牛顿-拉夫逊法, 潮流计算

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

利用风能进行发电是一种非常理想的发电方式, 大力发展风力发电, 不仅能减轻常规火力发电的压力, 也符合当今提倡环保的理念。然而风力发电机的输出功率主要取决于风速的大小, 但是风速的大小包含着许多不确定的因素, 所以风电机组的大规模并入电网势必会对整个电力系统造成很多方面的影响, 尤其是对整个系统的潮流计算[1] [2]。

潮流计算是整个电力系统分析的关键所在, 它主要的目的就是通过对电力系统已知的运行条件(网络结构、元件参数、发电机出力等)分析出整个系统的运行状态, 比如系统中的功率分布、功率损耗以及各个节点电压的幅值与相角[3]。通过这些数据我们可以了解到整个电力系统是否存在一些安全隐患, 比如电压越限等, 以及该系统是否符合经济性的要求[4]。现在应用最广泛的是常规的潮流计算, 所谓常规的潮流计算是指在系统的发电机出力等条件是已知的情况下进行的潮流计算。常规性的潮流计算主要分为牛顿-拉夫逊法和PQ分解法两种, 在这两者基础上又衍生出了许多新的潮流计算方法, 但都没有前两者应用广泛[5]。由于包含许多不确定因素的风能等清洁能源的并入电网, 给整个系统的潮流计算带来了前所未有的压力, 此时若采用常规性的潮流计算是无法得出准确的潮流结果的。

因此本文在常规性潮流计算的基础上, 提出了一种蒙特卡罗模拟的方法, 能够很好的考虑到风电机组在并网时的不确定性, 并且收敛速度快, 能够满足工程的精度要求。

2. 蒙特卡罗法

蒙特卡罗是一种将统计学与概率学结合起来解决数值统计问题本质属于随机模拟的方法, 其基本思想如图1所示[6] [7]。

例如, 假定 ω 是随机变量 X 的数学期望 $E(X)$, 我们用近似的方法确定 ω 的步骤是首先对 X 进行 N 次独立重复抽样, 生成 N 组 X 的值, 分别为 x_1, x_2, \dots, x_N , 其算数平均值为

$$X_N = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n \tag{1}$$

根据强大数定理

$$P\left(\lim_{N \rightarrow \infty} X_N = \omega\right) = 1 \tag{2}$$

当 N 趋近于无穷大时, $X_N \approx E(X) = \omega$ 成立的概率为1, 所以我们可以用 X_N 来作为 ω 的替代值[8]。



Figure 1. The basic idea of montecarlo
图 1. 蒙特卡罗基本思想

在本例中，首先按照选定的风速概率密度方程，通过 *Matlab* 生成大量符合条件的风速样本，而后利用风速求得风力发电机的有功功率，得到其概率统计特性，最后将风力发电机的出力代入电力系统的某一结点进行潮流计算。该方法生成的样本越多，得到的数据就越准确。

3. 风能模型

3.1. 风速概率模型

风速的概率模型是考虑不确定性的风电场并网潮流计算的一个重要方面，描述风速分布模型的有很多，例如 *Log-normal* 分布模型、*Gamma* 分布模型、*Burr* 分布模型、*Weibull* 分布模型等等，其中使用最普遍、与风速切合最好的是遵从两参数分布的 *Weibull* 分布模型[9] [10]，其概率密度函数

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (3)$$

通过其概率密度函数可以推导出其累积分布函数

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (4)$$

在上述的两式中， c 与 k 分别代表 *Weibull* 分布的尺度参数与形状参数，其中 c 反映的是风电机组的平均风速， v 代表的是给定风速，单位是 m/s。在本文中， $c = 8.0928$ ， $k = 2.3466$ [11]。

3.2. 风力发电机输出模型

根据相关数据分析可以得到风力发电机的输出功率随风速变化曲线大致如图 2 所示[12]。

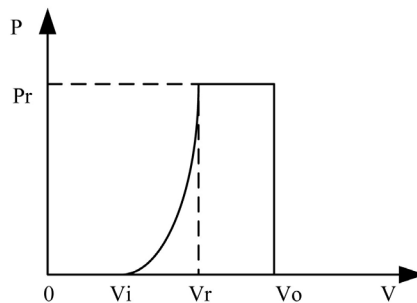


Figure 2. Wind turbine output power curve
图 2. 风力发电机输出功率曲线

风力发电机输出功率的表达式

$$P = \begin{cases} 0 & V \leq V_i \\ \frac{P_r}{V_r^3 - V_i^3} (V^3 - V_i^3) & V_i < V \leq V_r \\ P_r & V_r < V \leq V_o \\ 0 & V > V_o \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_r 是风力发电机的最大功率, V_i 是切入风速, V_o 是切出风速, V_r 是风力发电机刚达到最大功率时的风速。

4. 牛顿-拉夫逊法潮流计算

牛顿-拉夫逊法又叫牛顿法, 是一种经常被应用在处理非线性问题上的办法, 它的本质就是通过用直线代替曲线, 将原来非线性的问题逐渐线性化, 反复迭代进行求解[13]。

当使用直角坐标表示节点电压时

$$U_i = e_i + jf_i \quad (6)$$

导纳矩阵元素为

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (7)$$

将上式带入节点功率的方程可得

$$P_i = e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_j \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \quad (8)$$

$$Q_i = f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - f_j \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \quad (9)$$

式中: e_i 与 f_i 为节点电压的实部与虚部, G_{ij} 与 B_{ij} 为节点导纳矩阵的实部与虚部, P_i 与 Q_i 分别代表节点的有功功率与无功功率。

设 $1 - m$ 号节点 PQ 为节点, P_{is} 与 Q_{is} 分别为第 i 节点给定的有功功率和无功功率, 由此可得各个节点的功率不平衡方程

$$\Delta P_i = P_{is} - P_i = P_{is} - e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - f_j \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) = 0 \quad (10)$$

$$\Delta Q_i = Q_{is} - Q_i = Q_{is} - f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + e_j \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) = 0 \quad (11)$$

设 $m + 1$ 到 $n - 1$ 号节点为 PU 节点, 此时的不平衡方程

$$\Delta P_i = P_{is} - P_i = P_{is} - e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - f_j \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) = 0 \quad (12)$$

$$\Delta U_i^2 = U_{is}^2 - U_i^2 = U_{is}^2 - (e_i^2 + f_i^2) = 0 \quad (13)$$

根据上述几式可以写出修正方程

$$\Delta W = -J \Delta U \quad (14)$$

然后通过求解修正方程, 将其结果带入上述几式一步步进行牛顿-拉夫逊法迭代, 直到计算结果达到给定误差要求, 从而求得各个节点电压的幅值与相角以及整个电力系统的潮流分布。

本文具体的潮流计算路线如图 3 所示。

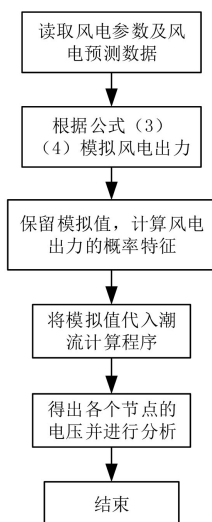


Figure 3. Flow calculation route
图 3. 潮流计算路线

5. 算例分析

本文的分析建立在 IEEE14 节点系统上, 其中平衡节点为 1 号节点, 风电场接入节点为 14 号节点, 系统的基准容量为 100 MVA, 其系统结构如图 4 所示。

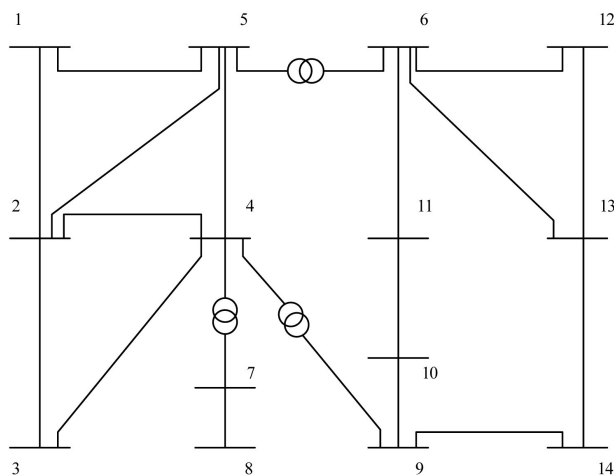


Figure 4. IEEE14 node system
图 4. IEEE14 节点系统

风力发电机单机参数如表 1 所示。

Table 1. Single wind turbine parameters

表 1. 单机参数

额定容量(kW)	切入风速(m/s)	切出风速(m/s)	额定风速(m/s)
600	3	25	15

根据第 2 节讲述的蒙特卡罗思想, 生成的样本数量越多, 误差越小, 得到的结果越准确。但在实际操作中是不现实的, 因为这样会导致计算极其繁琐。所以本文的模拟误差精度取 0.01, 通过文献[14]可以得到模拟的次数为 1024 次, 因此利用 *Matlab* 生成了 1024 组风速, 其风速期望值、风力发电机输出功率期望值及其两者的标准差如表 2 所示。

Table 2. Expected value and standard deviation of wind speed and output power
表 2. 风速及输出功率的期望值与标准差

风速期望值(m/s)	风速标准差(m/s)	输出功率期望值(kW)	输出功率标准差(kW)
7.68	12.59	476.02	158.54

将上述的风力发电机的输出功率期望值带入风电节点进行潮流计算, 假定每台发电机的输出功率与功率因数一致, 其中功率因数取 0.90。为了能够凸显不同风机容量下的潮流结果, 本文选取了三组分别为 10 台、50 台、80 台的风力发电机数作为对比, 各个节点电压幅值(标么值)与相角的潮流计算结果如表 3 所示, 计算精度取 0.0001。

Table 3. Power flow calculation results
表 3. 潮流计算结果

节点	电压幅值(p.u.)			电压相角		
	10 台	50 台	80 台	10 台	50 台	80 台
1	1.0600	1.0600	1.0600	0.0000	0.0000	0.0000
2	1.0450	1.0450	1.0450	-3.7751	-3.3416	-3.1317
3	1.0100	1.0100	1.0100	-10.7090	-10.1015	-9.6460
4	1.0222	1.0230	1.0234	-7.6438	-6.8260	-6.2068
5	1.0250	1.0262	1.0270	-6.3772	-5.6450	-5.0919
6	1.0700	1.0700	1.0700	-9.1896	-7.6633	-6.5159
7	1.0547	1.0515	1.0485	-8.5861	-7.1142	-5.9948
8	1.0900	1.0900	1.0900	-8.5861	-7.1142	-5.9948
9	1.0378	1.0303	1.0236	-9.0584	-7.2681	-5.8807
10	1.0360	1.0298	1.0243	-9.3869	-7.6212	-6.2769
11	1.0494	1.0462	1.0434	-9.4063	-7.7563	-6.5075
12	1.0495	1.0472	1.0451	-9.3405	-7.5855	-6.2585
13	1.0445	1.0417	1.0390	-8.5930	-6.5551	-4.9989
14	1.0085	0.9984	0.9893	-4.1382	-0.2466	-2.8279

从表 3 可以看出, 在潮流计算结果中, 距离风电机组并网节点较近的节点如 9、13 号节点的电压受其影响较大, 距离风电机组并网节点较远的节点如 2、3 号节点受其影响不明显。

6. 结论

随着人们环保理念的提高, 风力发电等清洁能源的大规模发展成为了必然的趋势, 所以含风力发电的电力系统潮流计算就成为了大规模风电并网的基础与关键。本文通过对风能模型的分析, 提出了一种

风速不确定时的风电场潮流计算, 该方法计算精度高, 考虑了风速上下波动对风力发电机的影响, 并且通过三组不同台数含风力发电机的节点系统验证了本方法的可行性与准确性。计算分析结果表明, 本文给出的潮流计算方法正确有效, 具有良好的鲁棒性, 并且从中可以看出风电场功率的大小以及风电场并网节点的选取会对整个电力系统产生或多或少的影响, 对以后大规模的风电并网潮流计算有很好的参考价值。

基金项目

国家级大学生创新训练项目, 项目编号: 201810429202, 201810429220。

参考文献

- [1] 王林, 杨佳俊. 含风电场的电网潮流计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(1): 49-53.
- [2] 曹敏, 尹福荣, 夏芸. 风电接入配电网后的继电保护方案研究[J]. 电气工程, 2016, 4(3): 173-179.
- [3] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析(下)[M]. 第4版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2016: 26.
- [4] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 第3版. 北京: 中国电力出版社, 2007: 104-105.
- [5] 仲涛, 张震. 浅谈潮流计算在电力系统中的应用[J]. 科技风, 2018, 1(30): 175, 177.
- [6] 董雷, 程卫东, 杨以涵. 含风电场的电力系统概率潮流计算[J]. 电网技术, 2009, 33(16): 87-91.
- [7] 刘志刚, 刘欢, 柳杰. 计及风电场概率模型的多目标无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2013(1): 197-203.
- [8] 徐忠济. 蒙特卡罗方法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985: 5-6.
- [9] 李慧, 孙宏斌, 张芳. 风电场风速分布模型研究综述[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(8): 62-66.
- [10] 衣丰艳, 张立伟, 艾晓飞, 等. 基于 Weibull 分布参数的风机翼型气动特性研究[J]. 流体动力学, 2016, 4(1): 1-7.
- [11] 毕永廷, 杨梅波, 师秀凤. 基于 MATLAB 的电力系统潮流计算[J]. 价值工程, 2016(18): 142-144.
- [12] 蔡德福, 周鲲鹏, 忻俊慧. 概率潮流计算方法研究综述[J]. 湖北电力, 2015, 39(10): 20-25.
- [13] 江岳文, 陈冲, 温步瀛. 含风电场电力系统的潮流计算[J]. 华东电力, 2008, 36(2): 86-89.
- [14] 段楠, 薛会民, 潘越. 用蒙特卡洛法计算可靠度时模拟次数的选择[J]. 煤矿机械, 2002(3): 13-14.