

新型电力系统中不确定性潮流计算的研究

廖泽伟

贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2023年3月29日; 录用日期: 2023年7月21日; 发布日期: 2023年7月31日

摘要

潮流计算是电网工作人员进行电力系统规划和电力系统运行监测的一个基础环节, 对电力系统稳定运行有着极为重要的意义。近年来, “碳中和”概念的提出迫使电力行业实行能源转型, 风力发电和光伏发电在电力系统中的渗透率逐渐提高。但由于风光发电具有很强的随机性, 因此新能源发电并网势必会导致电网随机波动增强, 对电力系统安全和稳定的运行产生不利影响。概率潮流分析可以解决含风光等不确定性因素的电力系统潮流计算准确性问题, 有助于识别电力系统的薄弱环节和高风险工作方式, 也可在网络规划和决策提供有价值的参考。本文采用基于蒙特卡洛法和半不变量法的概率潮流计算方法, 对含风光等不确定性因素的电力系统进行潮流分析, 得到节点电压和支路功率的概率分布函数以及节点电压越限概率等信息, 为电力系统规划和运行提供有价值的反馈。

关键词

潮流计算, 风力发电, 光伏发电, 概率潮流

Research on Uncertain Power Flow Calculation in New Power Systems

Zewei Liao

School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: Mar. 29th, 2023; accepted: Jul. 21st, 2023; published: Jul. 31st, 2023

Abstract

Power flow calculation is a fundamental step for power system planning and operation monitoring by power grid personnel, and is of great significance for the stable operation of power systems. In recent years, the introduction of the concept of “carbon neutral” has forced the power industry to implement energy transformation, and the penetration of wind and photovoltaic power generation in the power system has gradually increased. However, due to the strong randomness of wind

power generation, the grid connection of new energy generation will inevitably lead to increased random fluctuations in the power grid, which will have a negative impact on the safe and stable operation of the power system. Probabilistic power flow analysis can solve the accuracy problem of power flow calculation in power systems with uncertain factors such as wind and rain, help identify weak links and high-risk working modes in power systems, and provide valuable reference for network planning and decision-making. In this paper, a probabilistic power flow calculation method based on the Monte Carlo method and the semi invariant method is used to perform power flow analysis for power systems with uncertainties such as wind and solar power. The probability distribution functions of node voltage and branch power, as well as the probability of node voltage exceeding limits, are obtained, providing valuable data feedback for power system planning and operation.

Keywords

Power Flow Calculation, Wind Power Generation, Photovoltaic Power Generation, Probabilistic Power Flow

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



1. 引言

1.1. 光伏发电的简介

众所周知，太阳能是一种储量极为丰富的可再生能源，对太阳能的开发与利用是解决目前石油、煤等传统能源危机的一个重要途径，也是解决二氧化碳排放、全球变暖等环境问题的有利手段。光伏发电是一种利用半导体材料的光伏效应，将光照辐射能量转换为电能的新型发电方式。光伏电池的主要元件是光伏板，其中接触栅极为负极，金属接触面为正极。如图 1，光伏效应的主要过程为：太阳光照射到光伏板表面的栅极(上电极)，N 区的自由电子接受到太阳光子能量，当自身能量和太阳光子能量之和大于原子核对电子的吸引力时，自由电子从原子中逃逸到光伏板衬底(P 区)空穴位置，形成了电动势以及电流[1]。

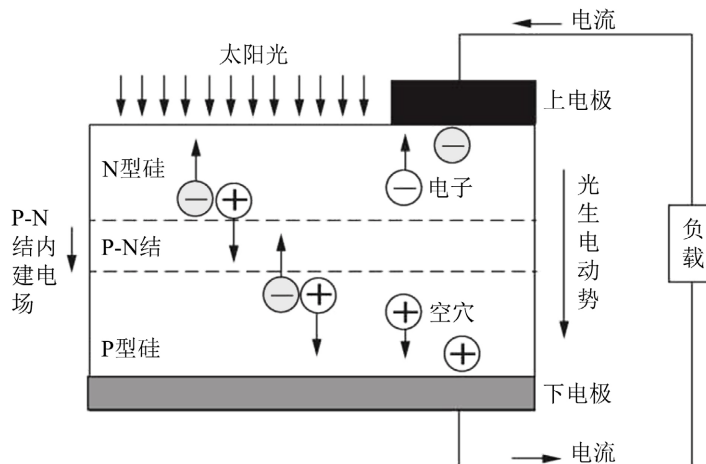


Figure 1. Photovoltaic effect schematic
图 1. 光伏效应原理图

目前,光伏发电可以分为独立运行和并网运行两种模式[2]。独立运行的光伏发电系统中的蓄电池是储能器件,结构简单、规模较小,主要应用于偏远的无电地区和容量较少的户用光伏系统。并网光伏发电系统与公共电网联接,分为集中式(如西北地区的大规模光伏发电系统)和分布式(如住宅联网型光伏系统)两类,具有能量利用率高、发电成本低等特点,是光伏发电的主要发展方向[3]。

光伏发电具有安全可靠、无噪音污染和无需消耗燃料等优点,是新能源发电的一个重要分支。首先光伏发电系统无机械转动部件,运行的故障率低并且维护相对简单;其次,太阳能是一种十分充足的可再生能源,满足了人们普遍追求的可持续发展方向;最后,光伏发电较少受地区资源的限制,除个别极地区,太阳光照在全球分布的均匀性比其他可再生能源(风能、潮汐能、水力等)好得多。综合以上各种因素,光伏发电越来越受到人们重视,在我国乃至全球范围内发展迅速[4]。

20世纪后半叶,全球各国陆续将光伏发电纳入到了国家发展重要战略之中。比如美国在1973年实行了“光伏建筑计划”[5]、日本从1974年起便开始实行“阳光计划”以及欧洲的“百万屋顶光伏计划”等等[6]。进入21世纪以来,发展中国家对光伏发电的重视程度逐渐变大,2016年印度新增装机容量超过900万千瓦时,其强劲的需求动力使得印度有望取代日本成为光伏需求第三大国;而拉美地区也增长迅速,阿根廷计划在2025年达成1000亿千瓦累计再生能源装机总量的目标,巴拿马近年也有大型光伏项目实行并网[7]。我国光伏产业的发展一直处于世界领先水平,2015年光伏发电累计装机量达到43GW,超过德国成为全球光伏累计装机量最大的国家[8]。“十三五”时期我国继续推动能源结构升级,将太阳能发电产业列为重点发展工程,截至2020年我国光伏市场累计装机总量达到253GW,同比增长60%。“十四五”时期,我国能源利用效率、环保水平将进一步提升,光伏产业将会得到进一步的发展[9]。

1.2. 风力发电的简介

风力发电技术是新能源发电技术中规模最大、成熟度最高以及商业化最完善的发电形式。风力发电利用自然界的风力带动风机叶片转动,切割风机磁感线的同时使用增速机作用于叶片,完成风能—机械能—电能的能量转换。一般而言当风速大于3 m/s的微风风速时,便可以开始发电[10]。

风力发电作为新能源发电的一个分支,有着许多的优点,比如:清洁能源、对环境友好;可再生能源,用之不竭;基建周期短,装机规模灵活等。正是因为风力发电具备以上优点,目前各国将风力发电技术的研究以及风机的建设纳入为国家重点发展战略。从全球范围来看,亚洲的风电市场份额最大,有印度和中国两大市场;欧洲次之,主要包括西班牙、丹麦和英国,其中丹麦风电发展最为成熟,风能占比达到47%;美洲市场则受到美国风能发展的影响[11]。

我国的风电累计并网装机容量从2013年的7716万kW稳步上升到了2020年底的2.8亿kW,累计总发电量达到4665亿Kw,同比增长15.1% [12]。然而,我国的风力资源呈现地域不平均的特点,陆地风能主要分布在西北的偏远地区,这些地区往往离电力负荷中心较远,陆上风电缺少消纳能力及系统性规划,弃风损失相当严重。此外,海上风力主要分布在东部沿海地区,海上风力的大规模发展使得沿海省份联系更加密切,并且在一定程度上避免了西电东送带来的电能损失问题。截至2021年5月,我国海上风电并网容量达到1042万Kw,并且海上风电年平均利用小时数约2500小时,比陆上风电高出约500小时[13]。因此,发展海上风力以及建设海上风电场是近年来的研究热点问题。

近年来,“碳达峰”和“碳中和”是我国可持续发展道路的热点话题,电力系统能源转型也得到了重大发展。无论是风力发电还是光伏发电,它们都对传统火电发电形式的碳排放问题起到了积极的抑制作用,因此发展新能源发电技术对我国实现“碳中和”的目标有着重大意义。然而需要注意的是,光伏发电对于光照强度等气候条件有着很强的依赖性,其输出功率与光照强度呈正相关,因而其随机波动性比较强;风力发电与风速直接相关,而风速受到气候、地形等因素的影响,因此风力发电也有着很强的

随机性。这些分布式电源大规模接入电力系统，将导致电网不确定性增强，给电网安全稳定运行、功率平衡问题带来巨大挑战。

1.3. 概率潮流计算的简介

潮流计算是运行人员进行电网规划和实时运行检测的一个基本环节，其计算结果是电力系统稳定与故障分析的基础。潮流计算的典型计算方程为：

$$\begin{cases} W = f(x, y) \\ Z = g(x, y) \end{cases} \quad (1.1)$$

式(1.1)中： W 为节点注入功率向量； x 为节点电压向量； y 为网络拓扑参数； Z 为支路有功和无功功率向量。

目前，很多时候电力系统潮流分析仍采用确定性潮流计算方法，在式(1.1)中给定节点注入功率向量和网络拓扑参数的确定值，求解节点电压和支路有功无功功率的确定解[14]。

然而，正如前述所言，大规模分布式电源的接入，会使得上述发电机出力等确定量随时间而变化，使得最后潮流计算结果变得不确定。此外，在规划中预测的负荷量与实际量之间存在误差、设备计划检修和故障检修以及输电设备的随机故障都会使得上述确定值发生变化，给确定性潮流计算带来了极大的困难。最后，微电网和电动汽车等新型方向的发展，极大地促进了源-网-荷之间的互动性，显著增强了电力系统的不确定性。若继续采用确定性潮流计算，电力系统规划人员需要对以上可能发生的所有情况进行依次计算，制定大量的计算方案，计算量非常庞大，计算时间难以承受。

基于以上的难点，1974年B. Borkowska提出的概率潮流计算得到了业内广泛的认可[15]。概率潮流计算将概率理论应用到描述电力系统随机性的波动之中，通过数学建模的形式解决随机变量的概率分布。在概率潮流计算之中，输入变量不再是节点注入功率的确定值，而是节点注入功率的概率分布函数，输出数据则是节点电压和支路功率的概率分布函数。概率潮流计算的诞生实现了对含有不确定性因素的电力系统的潮流分析，为电力系统规划提供设备选型的信息参考，为电力系统运行提供了及时的数据反馈。总之，概率潮流计算有助于识别电力系统的薄弱环节和高风险工作方式，也可为网络规划和决策提供有价值的参考。

自概率潮流计算出现以来，它的应用场景不断拓展，为电力系统分析提供了许多有价值的信息，主要包括以下几个方面：

1) 电力系统规划，包括无功规划、电源规划以及分布式电源的选址等问题[16]。电力系统规划需要通过潮流计算获得负荷预测、设备选址等信息，因此当系统中含有随机性变化的因素时，概率潮流计算便成为了如何规划电网的前提。

2) 静态安全分析，包括发电机停运、线路开断等情况。电力系统中发电机停运、负荷波动以及线路开断都具有不确定性，这些波动的产生会导致电力系统静态安全受到影响。文献[17]提出了一种基于概率潮流计算的静态安全分析方法，应用补偿法建立考虑了线路开断的概率模型，得到了预想事件表以及线路潮流的概率分布。

3) 电网运行状态实时分析，包括在线调度、风险预估以及源-网-荷的互动性判定等[18]。概率潮流计算是电网实现实时监测的一个基本环节，其计算结果可以为运行人员提供分析数据，对电网薄弱环节采取保护措施。

4) 其他应用还有最优化潮流计算[19]电力系统风险评估[20]以及互动型配电网潮流计算等。

2. 潮流计算

2.1. 基于蒙特卡洛法的概率潮流计算

随着电力系统规模的不断增大以及风力发电和光伏发电等不确定性电源渗透率的增加，电力系统随

机性逐渐增强,使得无论在电力系统规划还是电力系统实时运行检测中,传统的确定性潮流计算已经不再适用,概率潮流计算得到了广泛的应用。其中,蒙特卡洛法是最常用、最精确的算法,广泛用于概率潮流计算中。蒙特卡洛法的核心思想是进行重复计算,即将重复事件发生的次数视为该事件发生的概率,用频率逼近概率的思想对不确定性事件进行统计。由于需要大量重复计算,因此蒙特卡洛法虽然结果准确,但计算时间往往很大,并且与电网规模呈正相关。正因如此,在实际应用中蒙特卡洛法常常作为其他解析法或近似法的参考,以验证这些概率潮流算法的准确度。

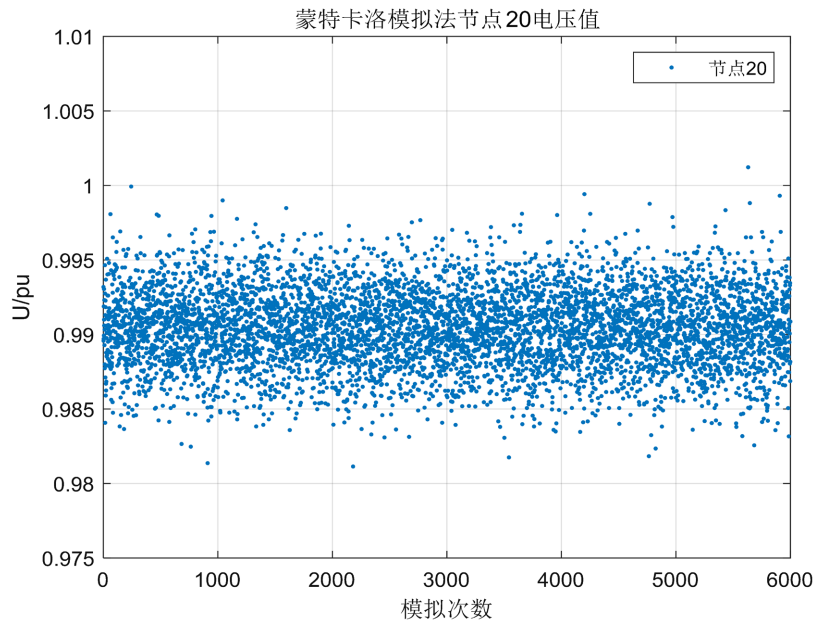


Figure 2. When $N = 6000$, the voltage random distribution of node 20
图 2. $N = 6000$ 时节点 20 的电压随机分布情况

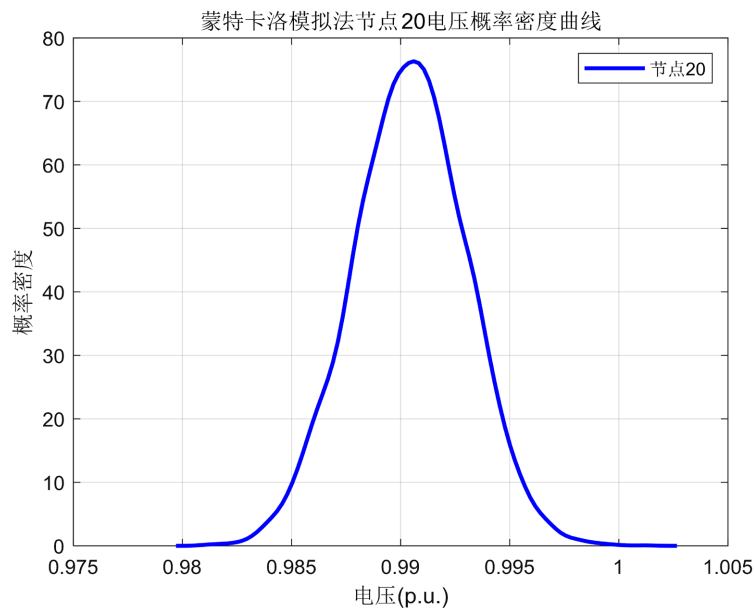


Figure 3. The voltage probability density function of node 20 when $N = 6000$
图 3. $N = 6000$ 时节点 20 的电压概率密度函数

在基于蒙特卡洛法的概率潮流计算中, 首先需要根据输入变量的数据特征, 得到发电机、负荷、光伏以及风力等输入随机变量的概率密度函数, 并随机生成一组随机数序列, 然后根据这一组随机数进行确定性潮流计算, 重复 N 次, 即可得到 N 组节点电压和支路有功、无功功率的样本值, 最后根据数学统计方法得到相应待求量的概率密度函数和累积分布函数。从中可以看出, 决定蒙特卡洛法准确度和计算时间的关键在于重复次数 N 的取值, 若 N 取值过小, 则会因为重复次数较少而造成结果不够准确, 若 N 取值过大, 则会使得计算时间过长。在经过精确度和计算时间综合考量后, 本文选用 $N = 6000$ 作为蒙特卡洛法的重复次数, 图 2 显示了在模拟次数 $N = 6000$ 次时, 节点 20 的电压幅值分布图, 对数据进行核密度估计即可得到相应节点电压的概率密度函数(图 3)。

本文基于蒙特卡洛法的概率潮流计算及风光出力的不确定性和节点注入功率的随机波动, 不考虑系统网络拓扑结构的改变和变压器变比的变化。该方法用于比较接入风光发电前后电力系统的节点电压变化, 直流潮流模型和交流潮流模型的计算时间和精度比较以及作为基于半不变量法的概率潮流计算的参考标准。蒙特卡洛法的计算步骤可以由以下流程图(图 4)表示:

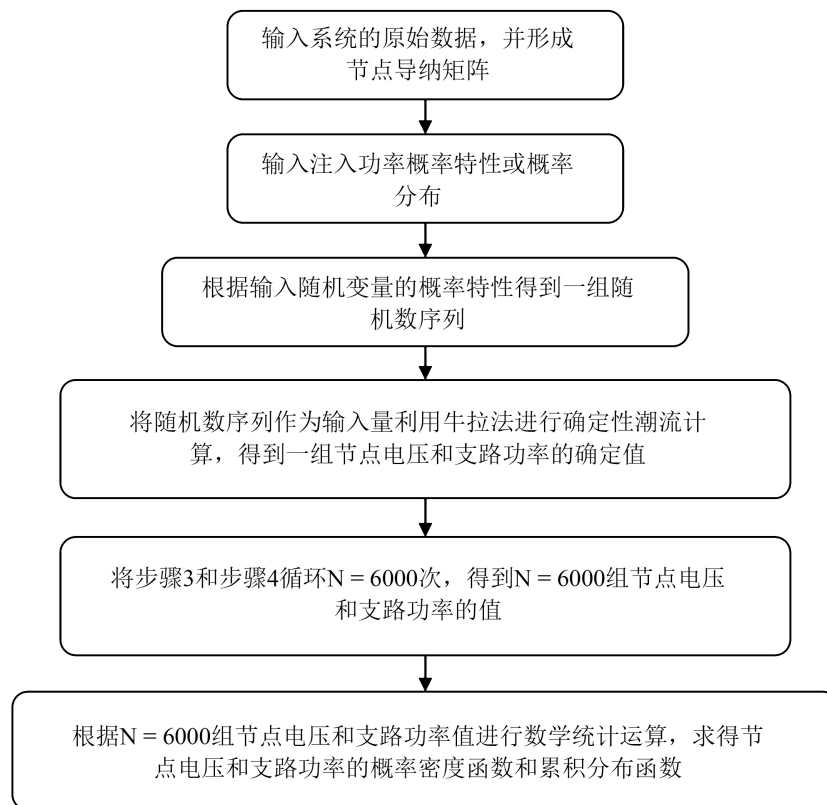


Figure 4. Flowchart of the monte carlo method

图 4. 蒙特卡洛法的流程图

2.2. 基于半不变量法的概率潮流计算

半不变量又称“累积量”, 是随机变量的一个数字特征, 其广泛用于求解多个变量组合的概率密度函数之和。由于半不变量可以将复杂的卷积计算转换为半不变量之间的简单算术运算, 因此可以大大降低了计算量和计算时间, 在电力系统概率潮流计算中应用场景非常广泛。正因如此, 本文还将在蒙特卡洛法的基础上提出基于半不变量法的概率潮流计算, 以求在更短的时间内获取电力系统的潮流数据。此

外, 由于半不变量法不会因为电力系统规模的扩大而使得计算时间大幅增加, 并且很好地规避了蒙特卡洛法所面临的收敛性问题, 因此在实际电网中得到了很好的应用。

在本文提出的基于半不变量法的概率潮流计算中, 选择 8 阶半不变量作为拟合条件, 考虑的输入随机变量有: 负荷服从正态分布、常规发电机服从二项分布、光伏发电服从 Beta 分布以及风力发电服从 Weibull 分布, 不考虑随机变量间的相关性以及系统拓扑结构变化, 具体步骤如下:

1) 输入 IEEE30 节点的电力系统原始数据, 包括电力系统的节点数、节点类型、基准容量、线路阻抗和对地导纳以及发电机出力及负荷功率; 随机变量的概率分布特性, 包括负荷的期望值和方差, 发电机的停运率和停运时间, 光伏出力的 Beta 分布形状参数以及风机出力的 Weibull 分布形状参数和比例参数;

2) 将随机变量的期望值带入到确定性潮流计算中, 利用牛拉法进行潮流计算得到状态变量 ΔX 、雅各比矩阵 J_0 和灵敏度矩阵 S_0 ;

3) 根据负荷、常规发电机以及光伏发电的概率特性, 利用第三章建立的概率模型, 继而计算出各节点注入功率的原点矩或者中心距, 从而利用它们与半不变量的关系得到各节点注入功率的半不变量 ΔW , 计算式:

$$\Delta W^{(\gamma)} = \Delta W_G^{(\gamma)} + \Delta W_L^{(\gamma)} + \Delta W_{pv}^{(\gamma)} \quad (2.1)$$

式中: $\Delta W_G^{(\gamma)}$ 、 $\Delta W_L^{(\gamma)}$ 、 $\Delta W_{pv}^{(\gamma)}$ 分别为常规发电机、负荷和光伏发电的 γ 阶半不变量;

4) 得到了各节点注入功率的 8 阶半不变量之后, 便可以利用公式(2.2)和(2.3)得到节点电压和支路功率的各阶半不变量;

$$\Delta X = J_0^{-1} \cdot \Delta W = S_0 \cdot \Delta W \quad (2.2)$$

$$\Delta Z = G_0 \cdot \Delta X = G_0 \cdot J_0^{-1} \cdot \Delta W = T_0 \cdot \Delta W \quad (2.3)$$

5) 采用 Gram-Charlier 级数展开求得节点电压和支路功率的概率密度函数和累积分布函数时, 那么根据中心矩和半不变量的关系, 求得节点电压和支路功率的各阶中心矩;

6) 由于采用步骤 5 中求得的概率密度函数 $f(z)$ 和累积分布函数 $F(z)$ 是随机变量 x 进行标准化后变量 z 的函数, 所以要得到随机变量 x 的概率密度函数 $f(x)$ 和累积分布函数 $F(x)$, 只需将 $f(z)$ 和 $F(z)$ 向右平移期望值 μ 个单位即可。

3. IEEE30 节点系统的算例分析

3.1. 原始数据及确定性潮流计算结果

本文采用 MATLAB 软件进行概率潮流计算程序的编写, 对改进的 IEEE30 节点电力系统中进行算例分析。该系统由 30 个节点、37 条支路和 4 台变压器组成(系统拓扑结构见图 5), 基准功率为 100 MVA, 且基础数据已归算为标么值。节点 1 为平衡节点, 节点 2、5、8、11 和 13 为 PV 节点, 其余节点为 PQ 节点。负荷服从正态分布, 标准差设为期望值的 10%; 常规发电机共有 6 台, 服从二项分布, 停运率为 5%; 节点 24 处接入光伏发电, Beta 分布的形状参数 a 、 b 由光照强度分布的数据样本得出, 光照强度最大值为 1.1333 Mw/m², 光伏组件的个数为 400, 每个组件面积为 2 m², 光电转换效率为 13%; 节点 15 处接入风力发电, Weibull 分布的参数 λ 和 k 分别设为 8 和 2, 切入风速为 3.5 m/s, 额定风速为 7.3 m/s, 切出风速为 13 m/s。当不接入光伏和风力发电时, 将节点 24 和 15 视为 PQ 节点。

当注入功率为期望值时, 运用确定性潮流计算求出各个节点的电压和相角以及支路潮流的有功功率和无功功率, 在下表中与系统原始数据一并给出。

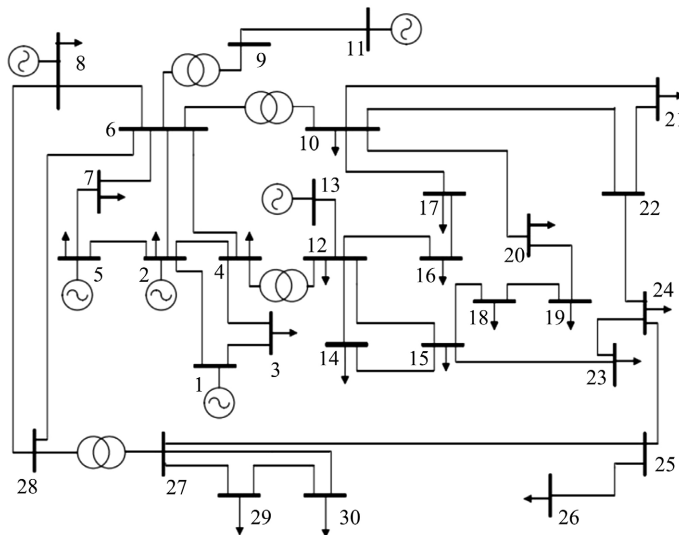


Figure 5. IEEE30 node system diagram
图 5. IEEE30 节点系统图

3.2. 算例验证

本文采用蒙特卡洛法和半不变量法两种概率潮流算法分别对计及风光发电的 IEEE30 节点改进的系统进行概率潮流计算，其中蒙特卡洛法的重复次数 N 决定了该算法的计算时间和计算精度，将蒙特卡洛法的收敛精度设为连续三次迭代后结果相差不超过 1%，当 $N = 1370$ 时达到收敛精度；考虑到曲线的平滑度、结果精度以及计算时间等多方面因素后，最终选择 $N = 6000$ 作为蒙特卡洛法的重复次数。半不变量法的级数展开方式以及半不变量保留的阶数决定了半不变量法的拟合精度和计算时间，本文采用 Gram-Charlier 级数和 Cornish-Fisher 级数展开拟合概率密度函数和累积分布函数，并选择保留到 8 阶半不变量以保证结果的准确度。以 $N = 6000$ 次的蒙特卡洛法作为标准，比较采用不同参数进行概率潮流计算时线路 10~21 的有功功率概率分布，表 1 给出了不同方法的计算时间和精度。

Table 1. Computational time and accuracy comparison of different methods
表 1. 不同方法的计算时间和精度比较

方法	计算时间	误差
蒙特卡洛法(N = 6000)	92.3s	0
蒙特卡洛法(N = 1370)	47.6s	2.732%
蒙特卡洛法(N = 4000)	79.6s	0.047%
半不变量法和 Gram-Charlier 级数展开(3 阶)	0.432s	8.76%
半不变量法和 Gram-Charlier 级数展开(6 阶)	0.576s	2.76%
半不变量法和 Gram-Charlier 级数展开(8 阶)	0.646s	0.121%
半不变量法和 Cornish-Fisher 级数展开(3 阶)	0.496s	6.43%
半不变量法和 Cornish-Fisher 级数展开(6 阶)	0.589s	1.66%
半不变量法和 Cornish-Fisher 级数展开(8 阶)	0.702s	0.064%

由上表可以直观地看出，蒙特卡洛法的计算精度很高但计算时间很长，而半不变量法在取较低阶数后计算精度很低，而在保留阶数达到 8 阶时精度符合要求，并且计算时间较短。综上，本文采用 $N = 6000$ 的蒙特卡洛法和 8 阶半不变量法和 Gram-Charlier 级数展开以及 Cornish-Fisher 级数展开进行算例分析。

为求得节点电压越限概率引入电压越限指标，定义如下：当 $U < 0.95 \text{ pu}$ 或 $U > 1.05 \text{ pu}$ 时，电压越限。为展示两种方法的有效性，挑选了典型的节点 3、17、22、29 以及典型线路 6-7、10-22、25-26 进行比较和验证，表 2 和表 3 显示了两种概率潮流算法下的典型节点电压平均值、标准差和越限概率以及线路有功无功功率的期望值和标准差。

Table 2. Typical node voltages for the two probabilistic algorithms

表 2. 两种概率算法的典型节点电压

节点 编号	蒙特卡洛法($N = 6000$)			半不变量法(Gram-Charlier 级数)		
	平均值	标准差	越限概率	平均值	标准差	越限概率
节点 3	1.0224	0.0322	32.7%	1.0227	0.0322	32.7%
节点 17	1.035	0.0223	13.1%	1.032	0.0224	13.3%
节点 22	1.0236	0.0313	27.4%	1.0229	0.0314	27.6%
节点 29	0.9978	0.0154	0%	0.9977	0.0154	0%

Table 3. Typical line power for two probabilistic algorithms

表 3. 两种概率算法的典型线路功率

线路 编号	蒙特卡洛法($N = 6000$)				半不变量法(Gram-Charlier 级数)			
	有功平均值	有功标准差	无功平均值	无功标准差	有功平均值	有功标准差	无功平均值	无功标准差
9	0.0272	0.002	0.0283	0.003	0.0272	0.002	0.0284	0.003
25	0.0873	0.002	0.457	0.001	0.0873	0.0022	0.4578	0.001
31	0.0355	0.007	0.0237	0.005	0.0354	0.0065	0.0240	0.0047

4. 总结

本文提出了一种考虑含光伏发电和风力发电不确定性随机变量的电力系统概率潮流计算方法，计及光伏出力、风机出力、常规发电机以及负荷波动的不确定性，并根据其概率分布特性建立相应的概率模型，最后对改进的 IEEE30 节点电力系统进行概率潮流分析。本文主要研究成果可以概况如下：

- 1) 当电力系统中接入风光发电时，节点电压和支路功率的随机波动变大，电力系统的不确定性增强；
- 2) 蒙特卡洛法的计算精度最高，但需要大量的计算时间；当半不变量法的保留阶数到 8 阶时，满足精度要求，且计算速度非常快。此外，在相同条件下半不变量法和 Cornish-Fisher 级数展开的结果较 Gram-Charlier 级数的结果更加精确。

参考文献

- [1] 于玮. 光伏效应的产生原理及其应用研究[J]. 电子世界, 2016(21): 11, 13.
- [2] 王宏华. 光伏发电技术系列讲座(1)光伏发电原理及发展现状[J]. 机械制造与自动化, 2010, 39(4): 186-189.
- [3] 周雯. 光伏发电发展趋势探究[J]. 化工管理, 2020(24): 58-59.

-
- [4] 王斯成. 光伏发电的现状与我国的差距[J]. 科技导报, 1993(7): 39-40.
- [5] Conti, S. and Raiti, S. (2007) Probabilistic Load Flow Using Monte Carlo Techniques for Distribution Networks with Photovoltaic Generators. *Solar Energy*, **81**, 1473-1481. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.02.007>
- [6] 赵来鑫. 含光伏电站的电力系统概率潮流计算[D]: [硕士学位论文]. 保定: 华北电力大学, 2017.
- [7] 张芳, 邹俊. “十四五”时期我国光伏产业市场培育的前景、困境与路径选择[J]. 湖北经济学院学报(人文社会科学版), 2021, 18(3): 43-46.
- [8] 2020年我国光伏产业外贸发展情况[J]. 电器工业, 2021(5): 32-35.
- [9] 董梓童. 光伏产业出现垂直一体化新格局[N]. 中国建材报, 2020-08-08(13).
- [10] 沈艳霞, 杨雄飞, 赵芝璞. 风力发电系统传感器故障诊断[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(3): 321-328.
- [11] 席军. 风力发电行业的发展状况[J]. 科技风, 2018(30): 186.
- [12] 李军军, 吴政球, 谭勋琼, 陈波. 风力发电及其技术发展综述[J]. 电力建设, 2011, 32(8): 64-72.
- [13] 廖圣瑄, 陈可仁. 能源岛: 深远海域海上风电破局关键[J]. 能源, 2021(5): 46-49.
- [14] 戴小青. 电力系统概率潮流新算法及其应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2006.
- [15] Borkowska, B. (1974) Probabilistic Load Flow. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-93, 752-759. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1974.293973>
- [16] 邓威, 李欣然, 刘志勇, 等. 考虑无功补偿影响因素的间歇性分布式电源综合优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10): 80-88.
- [17] 张传成. 概率潮流在静态安全分析中的应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2009.
- [18] 姚建国, 杨胜春, 王珂, 等. 智能电网“源-网-荷”互动运行控制概念及研究框架[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 1-6, 12.
- [19] 陈思明. 最优化潮流计算的多小水电地区电网经济运行方案[J]. 云南电力技术, 2019, 47(5): 43-47.
- [20] 黎静华, 左俊军, 汪赛. 大规模风电并网电力系统运行风险评估与分析[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3503-3513.