

梯级水光互补联合发电系统运行安全分析方法及应用

罗彬¹, 苗树敏², 邱一苇³, 高浪¹, 陈刚², 王亮²

(1. 清华四川能源互联网研究院, 四川 成都 610023;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

3. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要:以水电为纽带的多能互补发电已成为提升清洁能源消纳水平的重要手段。梯级水光互补联合发电系统受光伏出力的强随机性和间歇性影响,极大地限制了互补系统的安全稳定运行。围绕梯级水光互补联合发电系统运行安全分析的实际工程问题,从互补系统的发电计划安全校核和安全运行区间分析两个角度,提出了基于多项式混沌理论的概率配点算法的运行安全分析方法并研发了相应软件。该方案可有效应对随机性影响下大规模场景抽样带来的求解效率问题,能够在保证计算精确性的前提下,显著提高求解效率,为互补系统的安全稳定运行提供了技术支持。

关键词:梯级水光互补系统;运行安全分析;多项式混沌理论;软件研发

中图分类号:TM711 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)03-0001-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210301

Operation Safety Analysis Method for Cascaded Hydro – photovoltaic Complementary Generation System and Its Application

Luo Bin¹, Miao Shumin², Qiu Yiwei³, Gao Lang¹, Chen Gang², Wang Liang²

(1. Sichuan Energy Internet Research Institute of Tsinghua University, Chengdu 610023, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

3. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Multi-energy complementary power generation system linked with hydropower has become an important means to enhance clean energy consumption. The cascaded hydro-photovoltaic complementary generation system is affected by the strong randomness and intermittence of photovoltaic output, which greatly limits the safe and stable operation of complementary system. Focusing on the practical engineering problems of operation safety analysis for cascaded hydro-photovoltaic complementary generation system, and as viewed from power generation plan safety check and safe operation interval analysis, an operation safety analysis method with probabilistic collocation point algorithm based on polynomial chaos theory is proposed, and the corresponding software is developed. The application shows that the proposed analysis method can effectively deal with solving efficiency problem brought by large-scale scene sampling with randomness, and can significantly improve the solving efficiency under the premise of ensuring calculation accuracy, which provides the technical support for safe and stable operation of the complementary system.

Key words: cascaded hydro-photovoltaic complementary generation system; operation safety analysis; polynomial chaos theory; software development

0 引言

大力发展清洁能源,是应对全球气候变化的大

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0905200);国家自然科学基金项目(51909133,51907099)

势所趋,是实现中国能源结构转型乃至经济结构调整的重要支点^[1-2]。截至2019年年底,中国清洁能源装机总容量已达 8.20×10^8 kW,占总装机容量的40.8%,其中,水电装机容量 3.56×10^8 kW,光伏装机容量 2.05×10^8 kW。然而,由于规划、管理、技术等方面的原因,部分地区弃水弃光的问题依然十分

突出。利用不同类型能源间的优势,实现多种清洁能源的互补发电,对于减少清洁能源弃电,建设绿色低碳的现代能源体系具有重要的价值^[3-6]。梯级水电具有装机容量大、调节性能好等优点,以水电为纽带的多能互补发电成为主要的研究与实践方向。

目前,针对水光等多能源互补系统的研究主要涉及以下 3 个方面:1) 水光互补系统的容量配置^[7-8],如文献[7]以系统弃风光电量最小和接入的风光总规模最大为目标,建立了水光风互补发电系统容量优化模型;文献[8]根据水光火的互补特性,提出了多能互补发电系统的容量配置规划方法,并权衡互补系统经济性与互补特性得到了多个规划水平年容量配置方案。2) 水光互补系统的互补方式及运行特性^[9-10],如文献[9]针对国际上首个水光互补项目——龙羊峡水光互补项目,从电站发电特性、水光互补方式、运行方式等关键技术进行了研究;文献[10]结合多能互补发电系统的运行特点,构建了适用于评价风光水互补特性的指标框架,并以西部某省风光水互补系统为例,分析了其发电运行特性。3) 水光互补系统的运行调度^[11-12],如文献[11]针对风电并网带来的出力随机性和波动性问题,提出了一种计及风电不确定性的风-水短期联合优化调度方法;文献[12]以水光互补系统在调度期内的调峰能力最大以及互补系统出力与预先给定的发电计划曲线的偏差最小为优化的目标函数,综合考虑电力系统和水量平衡的约束条件,建立了水光互补的短期优化调度模型。总体来看,目前的研究对于互补系统运行安全的校核鲜有涉及。梯级水光互补系统不仅存在水电与光伏的互补关系,而且梯级水电站上下游同样存在紧密的水力联系,特别是光伏强随机性、间歇性问题,对梯级水光互补系统的运行安全带来不利影响,且伴随未来随机性清洁能源装机比例的提高愈加明显。

为此,围绕梯级水光互补联合发电系统运行安全分析的实际工程问题,从互补系统的发电计划安全校核和安全运行区间分析两个角度,提出了基于多项式混沌理论的概率配点算法的运行安全分析方法并研发了分析软件。该方案可有效应对随机性影响下大规模场景抽样带来的求解效率问题,能够在保证计算精确性的前提下,显著提高求解效率,为互补系统的安全稳定运行提供了技术支持。

1 整体解决思路

整体解决思路如图 1 所示,围绕梯级水光互补联合发电系统的发电计划安全校核和安全运行区间分析两个工程问题,开展互补系统的运行安全分析。在算法层面,提出了基于多项式混沌理论的概率配点算法,以解决光伏随机性出力的降维处理;在应用层面,设计并研发了运行安全分析软件。

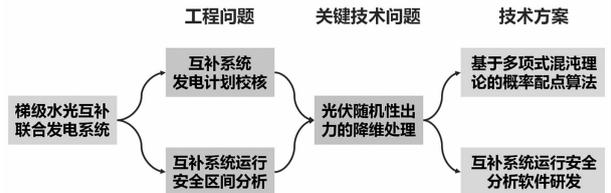


图 1 整体解决思路

2 运行安全分析方法

2.1 基于多项式混沌理论的概率配点算法

光伏的随机性是影响互补系统运行安全的主要因素,采用正交多项式刻画光伏出力随机性^[13-14]。取光伏出力随机变量 p 的多项式函数构成基 $\phi_i(p)$, ($i = 1, 2, 3, \dots, N$), 在这组基组成的函数空间 $\text{span}\{\phi_i\}$ 中逼近系统动态响应 $x = g(p)$ 。各基正交,即两基的内积满足:

$$\langle \phi_i(p), \phi_j(p) \rangle = \int_p \phi_i(p) \phi_j(p) dW(p) = \gamma_{ij} \delta_{ij} \quad (1)$$

式中: P 为随机变量 p 的支持域; $W(p)$ 为概率测度。以 3 阶正交多项式基为例,系统响应 x 的多项式混沌逼近表示为

$$\tilde{x} = \sum_{i=0}^3 c_i \phi_i(p) \quad (2)$$

而后基于概率配点法理论与成熟的电力系统分析软件 PSD-BPA,求解上述多项式逼近系数 c_i ,具体方法如下:

首先,依据光伏概率分布,构造 N 阶最优正交多项式基 ϕ_0, \dots, ϕ_N ,使其满足式(1)所定义的正交性。例如:对于均匀分布的随机变量,选择勒让德(Legendre)正交多项式作为基函数;对于高斯随机变量,则选择埃尔米特(Hermite)正交多项式作为基函数^[15]。而后计算 $N+1$ 阶多项式 ϕ_{N+1} 的所有 $N+1$

个零点作为最优配置点,记为 $\{p_0, p_1, \dots, p_N\}$ 。

其次,将各个配置点 $\{p_0, p_1, \dots, p_N\}$ 依次代入BPA软件中进行动态仿真计算,采用BPA接口算法进行批处理分析^[16-17],得到 $N+1$ 个待研究响应量(如节点电压、线路功率、发电机功角差等电力系统潮流和稳定计算结果,记为 x)的数值,记为

$$\{x(p_0), x(p_1), \dots, x(p_N)\} \quad (3)$$

然后,求解式(4)线性方程,解得待定系数,代回多项式混沌展开式(2)中。

$$\begin{bmatrix} x(p_0) \\ \vdots \\ x(p_N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_0(p_0) & \cdots & \phi_N(p_0) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \phi_0(p_N) & \cdots & \phi_N(p_N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_0 \\ \vdots \\ C_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\begin{bmatrix} x(p_0) \\ \vdots \\ x(p_N) \end{bmatrix}$ 为 BPA 仿真所得响应量;

$\begin{bmatrix} \phi_0(p_0) & \cdots & \phi_N(p_0) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \phi_0(p_N) & \cdots & \phi_N(p_N) \end{bmatrix}$ 为常数矩阵; $\begin{bmatrix} C_0 \\ \vdots \\ C_N \end{bmatrix}$ 为待定系数。

最后,对所得多项式混沌展开式(2)进行蒙特卡罗(Monte Carlo)抽样。由于式(2)为显式解析表达式,可直接代入 p 的抽样数值计算而无需运行电力系统仿真,因此对其进行蒙特卡罗抽样可快速求得研究系统响应的概率分布特性,实现互补系统的安全运行能力分析。

2.2 互补系统发电计划动态安全校核流程

互补联合发电系统的发电计划安全校核主要实现发电计划的安全性校核,提高发电计划的合理性和可执行性,其具体流程步骤为:

1) 数据准备。主要包括拟分析互补系统的光伏出力预测、系统负荷预测及梯级水电的发电计划,以及互补系统接入电网的网架结构拓扑、线路、变压器、发电机等设备参数模型。以上参数可通过电网运行及管理系统获取。

2) 光伏随机性刻画获得光伏采样配置点。根据所提取的分布式光伏出力预测数据,从预测结果的期望和方差、出力波动上下边界两个方面刻画光伏的随机性,随机性描述方法如第2.1节所述,得到光伏采样的配置点,定义为

$$\{p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_n\} \quad (5)$$

3) 给定光伏配置点 x_i ,并结合步骤1中所提取

的梯级水电发电计划、负荷预测、电网网架拓扑及设备参数,形成运行方式,用于PSD-BPA软件安全稳定分析。

4) 基于光伏配置点 p_i 的运行方式,采用BPA软件对运行方式进行仿真计算,得到互补系统的电气响应量,以节点电压为例,记作 $V(p_i)$ 。

5) 重复步骤4,遍历所有的光伏配置点,得到互补系统一系列的节点电压响应量,即

$$\{V(p_1), V(p_2), V(p_3), \dots, V(p_i), \dots, V(p_n)\} \quad (6)$$

6) 多项式混沌展开。将所得到的节点电压响应量,采用多项式混沌展开,得到了互补系统的节点电压响应量与光伏随机变量之间的近似函数关系,即公式(4)。

7) 采用蒙特卡罗随机抽样方法对步骤6中所得的多项式混沌展开式进行抽样,得到考虑光伏出力随机性下互补系统的节点电压的概率分布。同理,可得到互补系统的其他电气响应量,例如联络线功率波动的概率分布、发电机功角差的概率分布、系统频率的概率分布等。

8) 根据系统响应量的阈值边界以及置信概率,分析得到互补系统发电计划安全校核结果。

互补系统发电计划动态安全校核流程如图2所示。

2.3 互补系统的动态安全运行区间分析流程

通过互补联合发电系统的安全运行区间分析方法,分析得到互补系统的安全运行区间,为发电计划的编制提供安全边界。以梯级水电站注入功率空间中的安全边界为例,其分析搜索的具体流程为:

1) 数据准备。与第2.2节步骤1相同,不再赘述。

2) 随机选择搜索初始点。对于某梯级水电站 i 的有功出力,搜索初始点记作 $p_{\text{hydro}}(i, \text{ini})$,满足:

$$0 \leq p_{\text{hydro}}(i, \text{min}) \leq p_{\text{hydro}}(i, \text{ini}) \leq p_{\text{hydro}}(i, \text{max}) \leq p_{\text{hydro}}(i, N) \quad (7)$$

式中: $p_{\text{hydro}}(i, \text{min})$ 、 $p_{\text{hydro}}(i, \text{max})$ 分别为考虑水力约束的梯级水电出力上、下限; $p_{\text{hydro}}(i, N)$ 为水电站 i 的额定装机容量。

3) 采用第2.2节所述方法校核初始点在光伏随机出力条件下是否安全。若不安全,则转至步骤2,重新构造初始点;若安全,转至步骤4至步骤6搜索安全上边界,同步转至步骤7至步骤9搜索安全下边界。

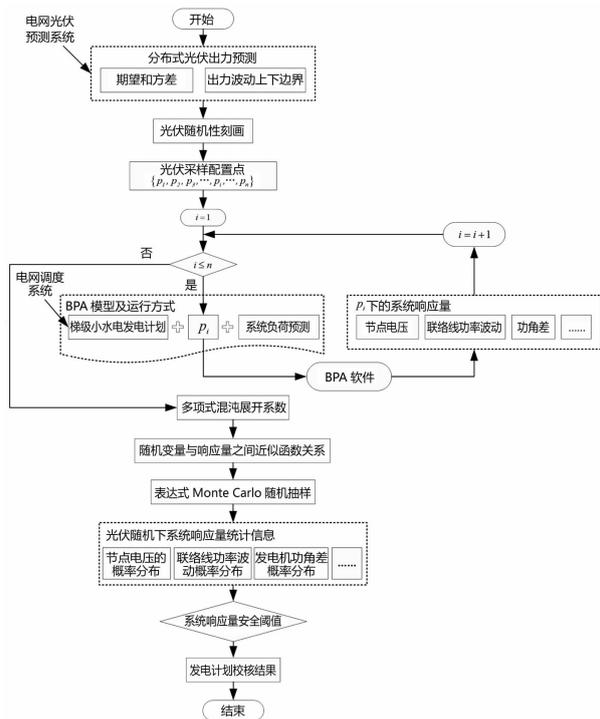


图 2 互补联合发电系统发电计划校核流程

4) 搜索安全上边界 $p_{\text{hydro}}(i, \text{upbound})$ 。设置收敛精度 α , 这里设置为 0.5, 并设置:

$$\begin{aligned} p_{\text{hydro}}(i, \text{low}) &= p_{\text{hydro}}(i, \text{ini}) \\ p_{\text{hydro}}(i, \text{up}) &= p_{\text{hydro}}(i, \text{max}) \end{aligned} \quad (8)$$

5) 校核是否满足收敛精度要求, 即

$$p_{\text{hydro}}(i, \text{up}) - p_{\text{hydro}}(i, \text{low}) \leq \alpha \quad (9)$$

若满足, 则安全上边界 $p_{\text{hydro}}(i, \text{upbound}) = p_{\text{hydro}}(i, \text{low})$, 安全上边界搜索结束, 转至步骤 7; 若不满足, 则转至步骤 6。

6) 设置新搜索点 $p_{\text{hydro}}(i, \text{new})$, 满足:

$$p_{\text{hydro}}(i, \text{new}) = \frac{p_{\text{hydro}}(i, \text{up}) + p_{\text{hydro}}(i, \text{low})}{2} \quad (10)$$

并校核新搜索点 $p_{\text{hydro}}(i, \text{new})$ 是否满足安全, 若满足, 则令:

$$\begin{aligned} p_{\text{hydro}}(i, \text{low}) &= p_{\text{hydro}}(i, \text{new}) \\ p_{\text{hydro}}(i, \text{up}) &= p_{\text{hydro}}(i, \text{max}) \end{aligned} \quad (11)$$

若不满足, 则令:

$$\begin{aligned} p_{\text{hydro}}(i, \text{low}) &= p_{\text{hydro}}(i, \text{ini}) \\ p_{\text{hydro}}(i, \text{up}) &= p_{\text{hydro}}(i, \text{new}) \end{aligned} \quad (12)$$

转至步骤 5。

7) 搜索安全下边界 $p_{\text{hydro}}(i, \text{lowbound})$ 。设置收敛精度 α , 这里设置为 0.5, 并设置:

$$p_{\text{hydro}}(i, \text{low}) = p_{\text{hydro}}(i, \text{min}) \quad (13)$$

$$p_{\text{hydro}}(i, \text{up}) = p_{\text{hydro}}(i, \text{ini}) \quad (14)$$

8) 校核是否满足收敛精度要求, 即

$$p_{\text{hydro}}(i, \text{up}) - p_{\text{hydro}}(i, \text{low}) \leq \alpha \quad (14)$$

若满足, 则安全下边界 $p_{\text{hydro}}(i, \text{lowbound}) = p_{\text{hydro}}(i, \text{up})$, 安全下边界搜索结束, 转至步骤 10; 若不满足, 则转至步骤 9。

9) 设置新搜索点 $p_{\text{hydro}}(i, \text{new})$, 计算方式同样采用式(10)所述计算方式。校核新搜索点 $p_{\text{hydro}}(i, \text{new})$ 是否满足安全, 若满足, 则令:

$$p_{\text{hydro}}(i, \text{low}) = p_{\text{hydro}}(i, \text{min}) \quad (15)$$

$$p_{\text{hydro}}(i, \text{up}) = p_{\text{hydro}}(i, \text{new}) \quad (15)$$

若不满足, 则令:

$$p_{\text{hydro}}(i, \text{low}) = p_{\text{hydro}}(i, \text{new}) \quad (16)$$

$$p_{\text{hydro}}(i, \text{up}) = p_{\text{hydro}}(i, \text{ini}) \quad (16)$$

转至步骤 8。

10) 完成梯级水电站 i 的安全运行区间分析, 其安全运行区间为 $[p_{\text{hydro}}(i, \text{lowbound}), p_{\text{hydro}}(i, \text{upbound})]$ 。

11) 重复以上步骤, 分析得到其他梯级水电的安全运行区间。

互补系统的运行安全区间分析流程如图 3 所示。

由以上分析可以得到, 单一梯级小水电的安全运行区间满足如图 4 所示的关系。

多个梯级水电站组成的安全运行区间为多维空间组合图形, 以 3 个梯级水电群为例, 则形成三维的安全运行区间, $p_{\text{hydro}}(i, N)$ 是水电站 $i (i = 1, 2, 3)$ 可能最大出力, 即装机容量; $p_{\text{hydro}}(i, \text{lowbound})$ 和 $p_{\text{hydro}}(i, \text{upbound})$ 分别表示水电站的考虑安全校核之后的安全区间的最小和最大出力, 如图 5 所示。

3 仿真分析

为验证所提方法的有效性, 以 IEEE 的 3 机 9 节点标准电力系统为实施算例, 如图 6 所示。假设 G1 和 G2 节点为梯级水电站, G3 节点为随机性光伏, 假设其出力均匀分布, 波动范围为 $[0.8, 2.2]$, 且波动随机, 如此构成梯级水光互补联合发电系统, 其设备参数为 IEEE 9 节点典型参数。

1) 计算随机性光伏的采样配置点。设置逼近阶数 $N = 5$, 则可得配置点 $\{r_0, r_1, r_2, \dots, r_{N-1}, r_N\}$ 为:

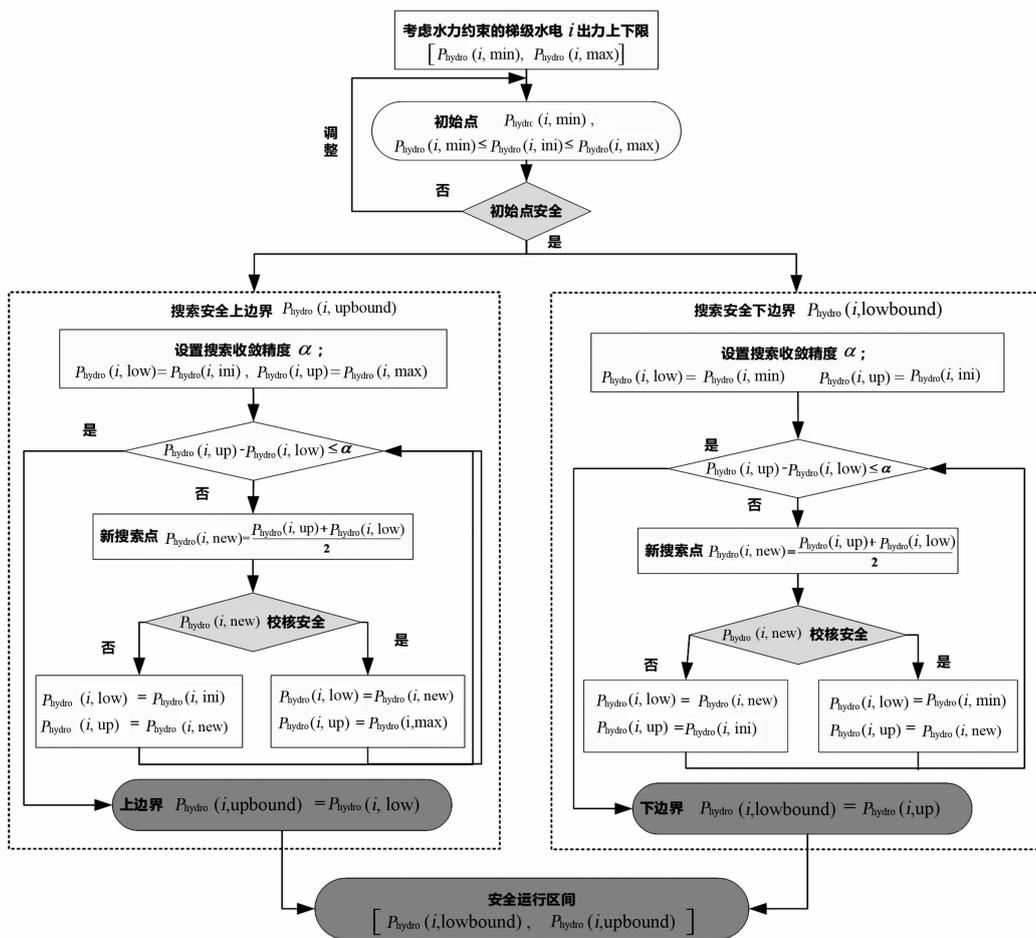


图 3 互补系统的运行安全区间分析流程

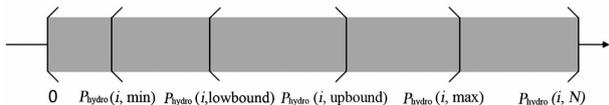


图 4 单一梯级水电站安全运行区间(一维)

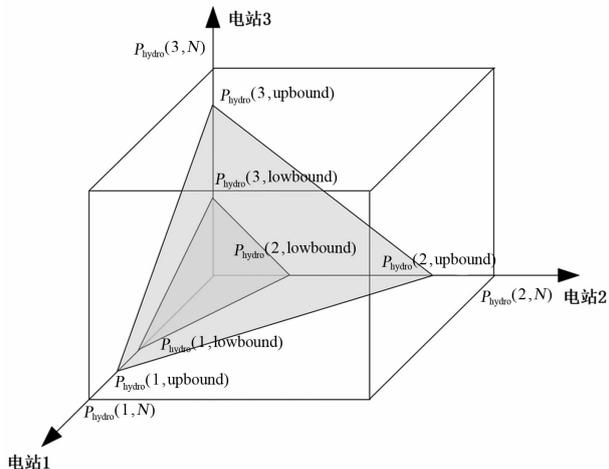


图 5 多梯级水电站安全运行区间(三维)

$\{-0.932470, -0.661209, -0.238619, 0.238619, 0.661209, 0.93247\}$; 根据随机性光伏波动范围, 计算得到随机性光伏的采样配置点,

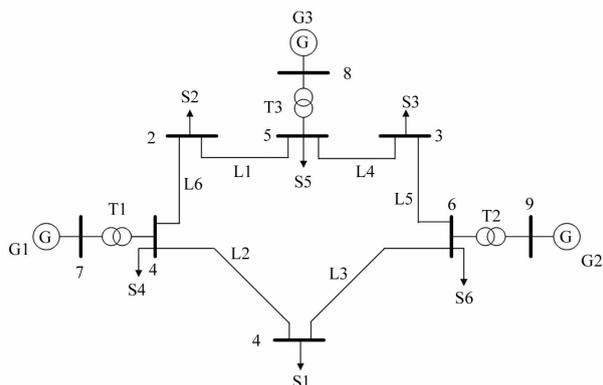


图 6 IEEE 的 3 机 9 节点测试算例

即 $\{x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N-1}, x_N\}$ 为 $\{0.84727, 1.03715, 1.33297, 1.66703, 1.96285, 2.15273\}$ 。

2) 开展系统状态响应量计算。采用 BPA 软件依次对上述随机性光伏采样配置点进行仿真分析, 得到电网系统的响应量, 此处以 G1 和 G2 在故障扰动后 10 s 时的功角差为例, 响应量为 $\{1.60031, 1.62374, 1.50680, 1.31337, 1.16755, 1.09747\}$ 。

3) 开展运行安全校核分析。计算多项式混沌展

开的系数为 {1.394 39, -0.316 12, -0.046 22, 0.068 21, -0.019 74, 0.002 43}。因此,得到随机变量与电网系统响应量之间的近似函数关系,即:

$$y = -1.836 4 + 10.058 2 \cdot x - 10.651 9 \cdot x^2 + 5.158 65 \cdot x^3 - 1.214 91 \cdot x^4 + 0.114 04 \cdot x^5 \quad (17)$$

设置蒙特卡罗随机抽样次数为 1000 次,对展开式进行随机抽样,得到功角差的概率分布,概率分布直方图如图 7 所示。

4) 根据功角差的阈值,从发电机功角稳定角度判断梯级水光互补系统运行安全。

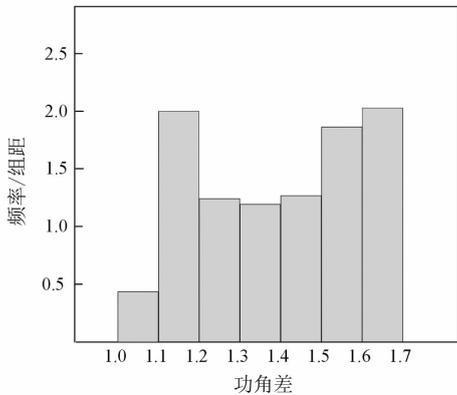


图 7 G1 与 G2 功角差概率分布

为验证所提方案的有效性和求解效率,作为对比,直接基于蒙特卡罗仿真方法对上述问题进行分析,即首先对光伏出力进行蒙特卡罗随机抽样,然后对每个随机抽样采用 BPA 计算得到 G1、G2 机组的功角差,如此重复达到抽样次数,最终得到功角差的概率分布。同样设置抽样次数为 1000 次,并采用同样的计算机环境。计算结果如表示 1 所示。

表 1 计算结果对比分析

方法	期望	方差	计算时间/s
所提方法	1.404	0.035 8	21.5
对比方案	1.390	0.035 6	2 801.6

在有效性方面,对比所提方法和对比方案计算所得功角差概率分布的期望和方差。所提方法计算得到功角差的期望为 1.404,方差为 0.035 8,对比方案计算所得功角差的期望为 1.390,方差为 0.035 6。所提方法所得期望、方差与蒙特卡罗抽样偏差均不超过 1%,验证了所提方法的有效性。

在求解效率方面,对比所提方法和对比方案的平均计算耗时。所提方法计算时间为 21.5 s,对比方案计算时间为 2 801.6 s,计算时间相差约 130 倍,验证了所提方法的求解效率。究其原因,由于对

比方案反复进行了 BPA 运行方式的计算,导致耗时显著增加,传统蒙特卡罗方法难以同时兼顾精度和求解效率。这也正是所提方法提出的初衷。

4 工程应用

目前,该分析方法已应用于国家重点研发计划“分布式光伏与梯级小水电互补联合发电技术与应用示范”项目,并研发了互补系统运行安全分析软件,涵盖运行模式展示、运行安全分析、实时数据接口管理等多个功能模块,支撑示范区互补系统的运行安全分析,部分典型界面如图 8 所示。



图 8 分析软件典型界面

5 结语

围绕梯级水光互补联合发电系统运行安全分析的实际工程问题,从互补系统的发电计划安全校核和安全运行区间分析两个角度,提出了基于多项式混沌理论的概率配点算法的运行安全分析方法并研发了分析软件。通过案例分析及实际应用验证了所提方法的有效性和求解效率,其突出特点是能够有效应对随机性变量作用下传统的大规模抽样问题,在保证计算精确性的前提下显著提高求解效率,对于支撑未来电力系统高比例的随机性清洁能源的大规模接入与并网提供了技术支撑。

参考文献

- [1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893 - 1904.
- [2] 马丽梅,史丹,裴庆冰. 中国能源低碳转型(2015—2050): 可再生能源发展与可行路径[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(2): 8 - 18.

(下转第 55 页)