

数据驱动的新能源电力系统暂态电压稳定关键影响节点筛选方法

王渝红, 刘咏玥, 高仕林, 廖建权, 王馨瑶, 王雪珂
(四川大学电气工程学院, 成都 610041)

摘要: 高比例新能源并网后, 电网电压支撑减弱, 电力系统的暂态电压稳定问题凸显。针对上述问题, 提出了一种基于数据驱动的电力系统暂态电压稳定关键影响节点筛选方法。首先, 对新能源电力系统的暂态电压稳定机理和暂态电压稳定性评估指标进行了分析; 其次, 采用任意混沌多项式对系统暂态电压稳定性及其影响因素之间的关联关系进行建模, 并采用非侵入性概率配置方法计算多项式展开项系数; 最后, 引入 Sobol 指数定义系统暂态电压全局灵敏度, 量化各个节点对系统暂态电压稳定性的影响程度。研究表明, 所提方法可快速准确分析各个节点功率对系统暂态电压稳定性的影响程度, 为暂态电压稳定紧急控制等提供依据。

关键词: 暂态电压稳定; 数据驱动; 暂态电压全局灵敏度; 任意混沌多项式; 关键影响节点; 新能源电力系统

Data-driven Approach for Identifying Key Influencing Nodes on Transient Voltage Stability of Power System with Renewables

WANG Yuhong, LIU Yongyue, GAO Shilin, LIAO Jianquan, WANG Xinyao, WANG Xueke
(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610041, China)

Abstract: With the high penetration of renewable energy being integrated to the power grid, the weakening of voltage support has accentuated the challenges of transient voltage stability in power systems. To address the above issues, a data-driven analysis method for key influencing nodes of transient voltage stability in power systems is proposed. Firstly, the voltage stability mechanism of the power system and the transient voltage stability evaluation indicators are analyzed. Subsequently, the arbitrary polynomial chaos are used to model the correlation between the transient voltage stability of the system and the influencing factors, and the coefficients of the polynomial expansion terms are calculated using a non-intrusive probabilistic collocation method. Finally, the Sobol index is introduced to define the global sensitivity of transient voltage and quantify the influence of each parameter on the transient voltage stability of the system. The results show that the method proposed in this paper can be adopted to quickly and accurately analyze the influence of each parameter on the transient voltage stability of the power system.

Key words: transient voltage stability; data-driven; transient voltage global sensitivity; arbitrary polynomial chaos; key influencing nodes; renewable power systems

0 引言

根据《电力系统电压稳定评价导则》, 暂态电压稳定的本质是指系统在受到扰动后, 电力系统能够在短时间内恢复到稳定的电压水平, 确保系统不发生电压崩溃。在传统电力系统中, 暂态电压稳定性主要与输电网络输电极限、负荷动态特性以及受端系统电压支撑 3 个方面相关^[1]。新能源发电具有区别于常规电源的出力及调节特性^[2], 高比例新能

源接入使电网动态特性深刻变化^[3-4]。随着高比例新能源并网, 电力系统暂态电压稳定机理发生改变, 暂态电压稳定分析中必须计及新能源、电力电子元件对电力系统的影响^[5-6], 传统电力系统暂态电压稳定分析方法难以适用。

目前, 已有研究针对新能源并网对电力系统暂态电压稳定性的影响展开了大量的研究工作。文献[7]研究了高比例新能源电力系统暂态电压特性与传统系统之间的差异, 得到其暂态电压稳定影响因素主要有系统功率-电压曲线的分段不连续性以及新能源机组的低电压穿越控制策略。文献[8-11]分析

了新能源电力系统的暂态电压稳定性机理, 研究了新能源接入对系统暂态电压稳定的影响。文献[12-16]通过暂态稳定性边界以及时域仿真方法研究了新能源电力系统的动态特性以及渗透率对系统暂态电压稳定性的影响, 并提出了提高新能源并网系统暂态电压稳定性的控制策略。上述研究深入分析了确定场景下的电力系统暂态电压稳定, 随着新能源大规模接入, 电力系统不确定性增强, 传统方法所得结论可能失效, 概率电压稳定分析方法受到广泛关注。文献[17-20]考虑负荷概率模型, 分析了系统在各负荷水平下的电压失稳概率, 但未考虑新能源不确定性。文献[21]利用随机响应面法(stochastic response surface method, SRSM)建立了风电场随机输入与电压稳定性输出之间的多项式关系, 并结合 Copula 函数与 Kendall 秩相关系数准确建模风电场相关性, 显著提升了电压稳定性分析的计算效率和准确性。然而, 该方法对含动态负荷波动大规模电网的适用性还有待进一步验证。文献[22]基于 Sobol 指数计算配电系统节点暂态电压对光伏发电功率变化的全局灵敏度, 并对其进行优先级排序, 获取了系统暂态电压稳定的关键影响节点。然而, 该方法仅考虑了分布式光伏并网不确定性对配网暂态电压稳定的影响, 难以适用于考虑多种不确定性的大规模新能源电力系统暂态电压稳定分析。

综上所述, 现有方法不能综合考虑多种类型新能源的不确定性对系统暂态电压稳定的影响, 且无法用于大型电力系统的暂态电压稳定分析。为此, 本文基于任意混沌多项式, 提出一种考虑多源不确定性的大规模新能源电力系统暂态电压稳定关键影响节点分析方法, 以分析各节点参数对系统暂态电压稳定性的影响。首先, 通过分析新能源电力系统的暂态电压稳定机理得到系统暂态电压稳定的潜在影响因素, 并基于暂态时域仿真构建了暂态电压稳定性评估指标; 其次, 采用任意混沌多项式对系统暂态电压稳定性与影响因素之间的关联关系进行建模, 并采用非侵入性概率配置方法计算多项式展开项系数; 进一步, 提出基于任意混沌多项式的暂态电压全局灵敏度分析框架, 量化各影响因素对系统暂态电压稳定性的影响程度, 计算得到系统暂态电压稳定的关键影响节点。最后, 将该方法用于含多类型新能源和动态负荷的 IEEE 9 节点、IEEE 39 节点系统和电压崩溃(chinese society for electrical engineering-voltage stability, CSEE-VC)算例系统, 分析

新能源电力系统的暂态电压稳定的关键影响节点。

1 新能源电力系统的暂态电压稳定性分析

1.1 含电力电子的电力系统暂态电压稳定机理

含电力电子的电力系统的动态过程可以用一组微分-代数方程(differential algebraic equation, DAE)建模^[10]表示为:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, y) \\ 0 = g(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 为系统状态变量, 如功角和转速等; y 为系统代数变量, 包括系统节点电压 U 和相角 θ 。下文根据电力电子端口的功率输出特性, 详细分析电力系统受扰前后系统 DAE 形式的变化。

以新能源场站为例, 在系统受扰时, 新能源场站送出功率一般可以表示为机端电压的函数。故障期间新能源发电控制有功电流为 0, 假设故障前后新能源都不提供无功功率, 则新能源端口功率表现为分段函数^[10]。进一步, 根据新能源发电的功率输出特性可知, 假设节点 i 为新能源节点, 修正 DAE 中代数方程可得:

$$\begin{cases} P_i + U_i \sum_{k=1}^n U_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) = 0 \\ Q_i + U_i \sum_{k=1}^n U_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: G_{ik} 为节点 i 和节点 k 之间线路的电导; B_{ik} 为节点 i 和节点 k 之间线路的电纳; P_i 为故障后的新能源节点 i 输出有功功率; Q_i 为故障后的新能源节点 i 输出无功功率。

根据 DAE 的稳定边界理论^[23], 在电力系统中, 式(1)遇到奇异点对应系统暂态电压失稳, 此时式(2)无解^[24]。由式(2)可知, 新能源场站功率输出特性的变化, 可能导致在故障结束后的暂态过程中出现代数方程奇异的情况, 此时新能源电力系统的电压发生崩溃。由此可知, 电力系统各设备的端口输出功率会对系统暂态电压稳定性产生影响。为此, 可对系统中各节点功率(新能源场站出力以及动态负荷功率)对系统暂态电压稳定性的影响进行研究。

1.2 暂态电压稳定性评估指标

根据《电力系统电压稳定评价导则》, 暂态电压稳定的工程判据为: 在电力系统受扰后的暂态过程中, 负荷母线的电压能够在 10 s 内恢复至 0.80 pu(表示额定值的 0.8 倍)以上。然而暂态电压稳定判据无法量化系统暂态电压的稳定程度, 因此,

本文考虑引入暂态电压稳定性评估指标。

考虑到实际系统中电力电子器件内部的动态特性以及控制策略,难以对式(1)进行解析求解来评估系统的暂态电压稳定性。为此,可以通过时域仿真评估系统暂态电压稳定性^[25]。为了根据时域仿真结果量化系统暂态电压稳定性,本文采用文献[25]提出的暂态电压稳定性评估指标——系统电压偏差指数(system voltage deviation index, SVDI),定义为变量 S_{VDI} 。该指标本质是电力系统在收到扰动前后系统所有节点的电压偏差。 S_{VDI} 通过故障前后电压和允许最小电压计算得到,具体定义如下:

$$S_{VDI}(t) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_b} |U_i(t) - U_i^{pre}|^2}{\sum_{i=1}^{N_b} |U_i^{min} - U_i^{pre}|^2}} \quad (3)$$

式中: N_b 为系统节点数; U_i^{pre} 为节点 i 故障前电压; U_i^{min} 为节点 i 允许最小电压; $U_i(t)$ 为节点 i 在 t 时刻的电压。

图 1 展示了电力系统在 3 种不同电压稳定情况下的节点电压分布情况。表 1 显示出图 1 的 3 种不同电压稳定状态下,在故障清除时刻,即 $t=t_{clr}$ 时 S_{VDI} 的大小。由表 1 可知,暂态电压稳定性越弱, S_{VDI} 越大。因此,所提出的指标可以准确评估系统暂态电压稳定性。

在推得暂态电压稳定评估指标后,可以通过分析新能源电力系统中节点功率与稳定评估指标之间的关系,得到系统暂态电压稳定关键影响节点。然而,针对大规模新能源电力系统,二者之间的关系难以通过解析方式得到。一方面, S_{VDI} 通过时域仿真得到,无解析表达式;另一方面,针对大规模系统,特别是在考虑各影响因素的不确定性时,利用机理分析难以解析推导稳定评估指标与影响因素之间的关系。为此,本文提出一种数据驱动的暂态电压稳定关键影响节点分析方法,以此作为机理分析方法的辅助工具,通过数据驱动模型拟合电压稳定评估指标与节点功率之间的关系。

1.3 数据驱动的新能源电力系统暂态电压稳定关键影响节点分析方法框架

本文所提基于数据驱动的新能源电力系统暂态电压稳定关键影响节点分析方法的总体框架如图 2 所示。首先,利用概率分布函数生成体现新能源出力和动态负荷水平不确定性的数据集,将其作为数据驱动分析方法中所需要的输入;其次,对新能

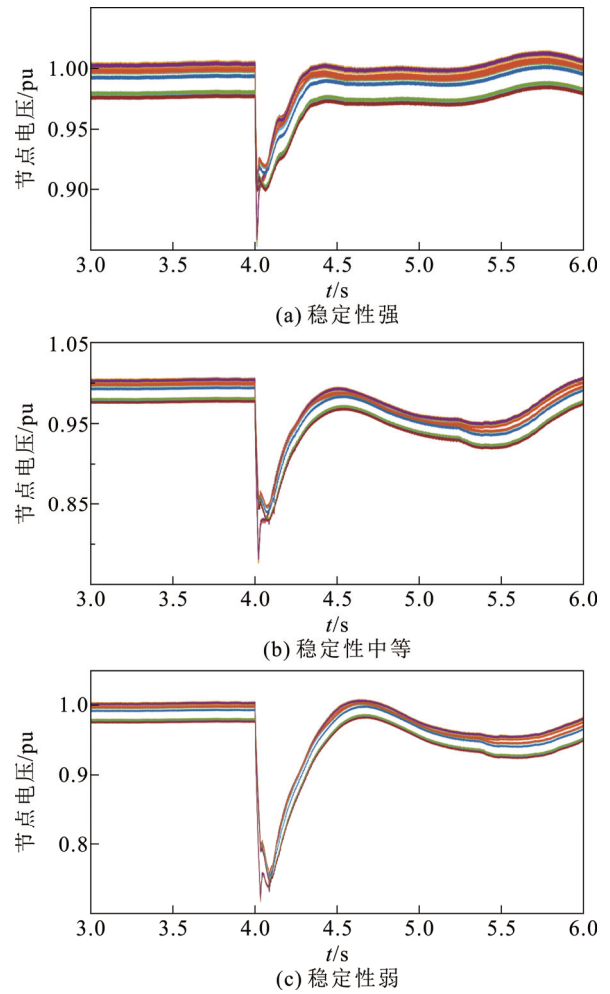


图 1 不同稳定状态下系统节点电压

Fig.1 System node voltages under different stable states

表 1 图 1 中对应状态的系统电压偏差指数

Table 1 S_{VDI} of the corresponding state in Fig.1

| 暂态电压稳定性 | $S_{VDI}(t_{clr})$ |
|---------|--------------------|
| 强 | 1.21 |
| 中 | 1.40 |
| 弱 | 2.45 |

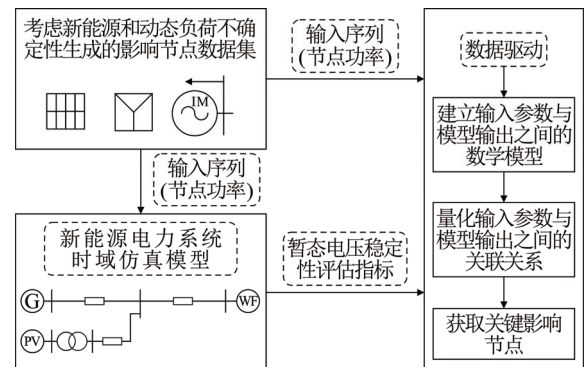


图 2 本文方法总体框架

Fig.2 Framework of the proposed method

源电力系统进行时域仿真, 得到暂态电压稳定性评估指标 S_{VDI} , 将其作为数据驱动模型输出; 进一步, 基于数据驱动模型建立输入序列和输出序列之间的关联关系; 最后, 通过计算全局灵敏度, 量化出输入参数与模型输出之间的关联关系, 得到对模型输出影响较大的暂态电压稳定关键影响节点。

2 电力系统暂态电压稳定性与其影响因素间的关联关系建模

本文基于数据驱动思想, 引入任意混沌多项式, 对系统暂态电压稳定性与新能源场站出力 and 动态负荷水平之间的关联关系进行建模。数据驱动方法通过对大量数据的统计分析, 提取潜在的规律, 不依赖明确的物理机理模型或先验知识, 而是基于数据本身的内在特征建立预测模型。与传统的基于理论模型或机理分析的方式不同, 数据驱动强调从已有的数据中发现规律, 不会受限于系统内部动态特性、系统规模大小、场景的不同等, 能够应用于各种场景的实际电力系统。任意混沌多项式 (arbitrary polynomial chaos, aPC) 是一种典型数据驱动方法, 其基于概率和统计原理, 通过少量正交多项式展开, 表征输入参数对系统输出的影响^[26], 特别是变量之间的非线性耦合关系。

2.1 任意混沌多项式建模原理

任意混沌多项式通过正交多项式展开, 拟合模型输出与模型输入参数的相关性。在新能源场站出力和动态负荷的随机波动影响下, 暂态电压稳定性指标的变化规律可近似表示为:

$$\Omega(\boldsymbol{x}, t, \boldsymbol{\omega}) \approx \sum_{j=0}^M c_j(\boldsymbol{x}, t) \Psi_j(\boldsymbol{\omega}) \quad (4)$$

式中: $\boldsymbol{\omega}$ 表示输入参数, 即新能源场站出力和系统的动态负荷水平; Ω 表示模型输出, 即暂态电压稳定性评估指标 S_{VDI} ; c_j 为第 j 个多项式的系数, 用于量化时间 t 下空间 \boldsymbol{x} 中每一个 $\boldsymbol{\omega}$ 变化对 Ω 的影响; Ψ_j 为 $\boldsymbol{\omega}$ 的多变量正交多项式基的简化表示, 用于将高维数据映射到低维空间, 从而减少数据的维度; M 为多项式的数量, 其数值取决于模型输入参数的数量 N 和多项式阶数 d , 表示为:

$$M = (N + d)! / (N! d!) - 1 \quad (5)$$

为进一步描述 Ψ , 定义 d 阶多项式集 $\{H_j^{(0)}, \dots, H_j^{(d)}\}$ 为参数空间中的正交基。单个参数 ω_j 的 k 阶多项式可以写为由 ω_j 不同幂构成的线性组合, 即:

$$H_j^{(k)}(\omega_j) = \sum_{i=0}^k H_{i,j}^{(k)} \omega_j^i, \quad k = 0, \dots, d; j = 0, \dots, N \quad (6)$$

式中: $H_{i,j}^{(k)}$ 为多项式 $H_j^{(k)}(\omega_j)$ 的系数。

进一步, 多变量正交多项式基可构造为单变量多项式的简单乘积:

$$\Psi_k(\boldsymbol{\omega}) = \prod_{j=1}^N H_j^{(\alpha_j^r)}(\omega_j), \quad \sum_{j=1}^N \alpha_j^r \leq M, \quad r = 1, \dots, N \quad (7)$$

式中: α_j^r 是一个多元指数, 包含单变量多项式所有可能乘积的组合信息。

根据上述分析, 系统暂态电压稳定性对新能源场站出力和动态负荷随机波动的响应可表示为多维多项式响应面, 具体可以定义为式(6)中的展开式定义。多项式系数由以下方程计算得到:

$$\begin{bmatrix} \mu_{0,j} & \mu_{1,j} & \cdots & \mu_{k,j} \\ \mu_{1,j} & \mu_{2,j} & \cdots & \mu_{k+1,j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mu_{k-1,j} & \mu_{k,j} & \cdots & \mu_{2k-1,j} \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{0,j}^{(k)} \\ H_{1,j}^{(k)} \\ \vdots \\ H_{k-1,j}^{(k)} \\ H_{k,j}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: μ_{ij} 是变量 ω_i 的第 i 个原始统计矩。系数 $H_{i,j}^{(k)}$ 使式(4)中的多项式在模型参数的给定输入分布中精确正交。

考虑概率空间中以 Γ 为概率测度的随机过程, 则根据正交性的定义可知:

$$\int_{\omega_j \in A} \hat{H}_j^{(k)}(\omega_j) \hat{H}_j^{(l)}(\omega_j) d\Gamma(\zeta) = \delta_{kl} \quad (9)$$

式中: A 为概率空间的随机过程中样本空间子集所构成的可测事件集合; ζ 为概率空间中的样本点; δ_{kl} 为克罗内克函数(Kronecker delta), 表示多项式之间的正交性。

正交多项式基可表示为:

$$\hat{P}_j^{(k)}(\omega_j) = \frac{P_j^{(k)}}{\|P_j^{(k)}\|} \quad (10)$$

式中: $P_j^{(k)}$ 是 ω_j 的 k 次原始正交多项式基; $\|P_j^{(k)}\|$ 是该原始正交多项式的范数, 用于将原始多项式归一化, 使其满足正交性条件。其中, 多项式的归一化常数表示为:

$$\|P_j^{(k)}\|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (P_j^{(k)}(\omega))^2 f(\omega_j) d\omega_j \quad (11)$$

为表征式(4)所示的系统暂态电压稳定性的变化规律, 采用非侵入性概率配置方法(non-intrusive probabilistic collocation method, NIPCM)计算多项式系数 c_j 。该方法重点关注新能源场站出力以及动态负荷的随机波动时, 系统暂态电压稳定性的变化。

NIPCM 的基本步骤为: 首先, 通过指定概率分布计算新能源场站出力以及动态负荷的输入序列; 其次, 在参数空间中选择 1 组配置点, 这些配置点用于在不同的输入值组合下评估模型; 最后, 对每个配置点评估系统暂态电压稳定性变化规律 M 次, 并采用多项式拟合模型空间 Ω , 其中配置点为参数集 $\{\omega_1^{(i)}, \dots, \omega_N^{(i)}\} (i=1, \dots, M)$, 并满足如下线性方程组:

$$\mathbf{M}_\Psi(\boldsymbol{\omega})\mathbf{V}_c(\mathbf{x}, t) = \mathbf{V}_\Omega(\mathbf{x}, t; \boldsymbol{\omega}) \quad (12)$$

式中: \mathbf{V}_c 为未知系数 c_j 构成的 $M \times 1$ 阶向量, 代表量化暂态电压稳定性的拟合系数; \mathbf{V}_Ω 为由每个配置点的模型输出构成的 $M \times 1$ 阶向量, 反映不同参数组合下的实际系统输出; \mathbf{M}_Ψ 为在配置点处确定的多项式矩阵, 表示不确定性参数与模型空间的映射关系。

综上所述, aPC 的特点是通过实际系统中的不确定输入参数建模, 从而量化其不确定性对系统输出结果的影响。下文通过处理输入参数获得具有新能源以及动态负荷不确定性的输入序列。

2.2 考虑新能源与动态负荷不确定性的 aPC 输入数据处理

新能源和动态负荷的显著特点是其运行具有不确定性, 且这种不确定性中包含新能源场站和动态负荷之间的相关性。因此, 本节首先对光伏出力、负荷功率以及风机出力数据进行不确定性建模; 然后考虑电力系统建模不确定性之间的随机相关结构, 对新能源场站出力以及动态负荷功率进行相关性建模; 最后, 获得每个新能源场站以及动态负荷的输入序列。

2.2.1 输入参数的不确定性建模

1) 光伏出力和负荷功率数据建模

首先, 分别获取日负荷曲线和光伏发电日曲线。其次, 按照均匀分布对各曲线进行随机抽样, 确定所有负荷的功率和所有光伏机组的出力。然后, 针对一天中每个小时中的不确定性, 对系统负荷采用正态分布^[27]建模, 对光伏发电采用 beta 分布^[28]建模。系统负荷不确定性的正态分布均值为 1, 标准差为 3.33%, 光伏发电的 beta 分布的 a 和 b 参数分别为 13.7 和 1.3^[29]。

2) 风机出力数据建模

对于风力发电, 一天中的风速平均值被认为是恒定的, 风速的不确定性使用韦布尔分布进行建模。在考虑风速不确定性后, 使用典型风力发电机的功率曲线来推导功率输出。风力发电场的总输出根据风力发电机的数量进行扩大或缩小。使用的韦布尔

分布参数为 $\phi=11.1$ 和 $k=2.2$ ^[30]。

2.2.2 输入参数的相关性建模

本文采用多元高斯 (multivariate Gaussian, mvG) copula 公式进行不同场站出力的相关性建模, 生成相关的输入数据集。

根据 Sklar 定理^[31], 任何多元联合分布都可以用单变量边际分布函数和描述变量间依赖结构的 copula 函数来表示。copula 函数中, 联结函数 C 可以用多元累积分布函数 (cdf-F) 和边际分布函数 (cdf-Fi) 表示, 即:

$$C(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)) = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (13)$$

式中: $F_n(x_n)$ 为参数 x_n 的边际分布函数; $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为 n 元累积分布函数。

由 2.2.1 节可知, 电力系统负荷、风机出力和光伏出力遵循不同的概率分布, mvG 可以有效模拟它们之间的相关性。mvG copula 公式中的 copula 函数可表示为:

$$C(u_1, u_2, \dots, u_n; \boldsymbol{\Sigma}) = \Phi_{\boldsymbol{\Sigma}}(\Phi^{-1}(u_1), \Phi^{-1}(u_2), \dots, \Phi^{-1}(u_n)) \quad (14)$$

式中: $\boldsymbol{\Sigma}$ 为对称正定矩阵, 其中 $\Sigma_{ii}=1$; $\Phi_{\boldsymbol{\Sigma}}$ 为具有相关矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}$ 的标准多元正态分布; $\Phi^{-1}(\cdot)$ 为正态累积分布函数 (cdf) 的逆。

式(14)中, 相关矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}$ 又称协方差矩阵, 可表示为:

$$\boldsymbol{\Sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \cdots & \sigma_{1n} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \cdots & \sigma_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \cdots & \sigma_{nn} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: σ_{mm} 为参数之间的线性相关系数, 表示不同依赖结构的范围。

同一组数据之间的相关性可以表示为:

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = \cdots = \sigma_{nn} = 1 \quad (16)$$

此时, 式(15)变换为:

$$\boldsymbol{\Sigma} = \begin{bmatrix} 1 & \sigma_{12} & \cdots & \sigma_{1n} \\ \sigma_{21} & 1 & \cdots & \sigma_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中: 协方差矩阵的元素根据 Pearson 相关系数^[32]构建。

3 基于全局灵敏度计算的暂态电压关键影响节点分析

在利用 aPC 建模节点功率和电压稳定评估了指标 S_{VDI} 之间的关系后, 可以通过暂态电压稳定全局

灵敏度分析得到系统暂态电压稳定关键影响节点。本章基于 Sobol 指数和 aPC 的多项式系数, 计算暂态电压全局灵敏度。在进行暂态电压稳定全局灵敏度计算时, 借助参数空间中的正交多项式基计算多项式系数, 建立多变量多项式, 并通过解析该多变量多项式获得输入参数对系统 S_{VDI} 影响的灵敏度指标。

3.1 暂态电压全局灵敏度计算原理

将用于灵敏度分析的 Sobol 指数^[22]引入 aPC 建模, 可通过 aPC 系数计算得到各影响因素的全局灵敏度, 其计算步骤为:

$$S_j^T = \sum_{(i_1, \dots, i_s); j \in (i_1, \dots, i_s)} S_{i_1, \dots, i_s} \quad (18)$$

$$S_{i_1, \dots, i_s} = \frac{\sum_{j=1}^M \chi_j c_j^2}{\sum_{j=1}^M c_j^2} \quad (19)$$

$$\chi_j = \begin{cases} 1, & \alpha_j^k > 0, \forall j \in (i_1, \dots, i_s) \\ 0, & \alpha_j^k = 0, \forall j \in (i_1, \dots, i_s) \end{cases} \quad (20)$$

式中: S_j^T 为 Sobol 总指数, 表示参数 ω_j 在考虑其他参数的相互作用下对模型 Ω 总方差的总贡献; (i_1, \dots, i_s) 代表一组参数的索引子集 (s 表示该子集包含的参数数量); S_{i_1, \dots, i_s} 为 Sobol 指数, 表示变量参数 ω_j 未考虑其他参数的相互作用下对输出 Ω 总方差的贡献; s 为参数的数量; χ_j 为指数选择运算符, 表示所有参数 ω , 即 $[\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_s]$, 在展开式中同时对模型结果产生的影响。

根据式(18)可以定义多参数影响下的加权暂态电压全局灵敏度指数 $S_{\omega_j}^2$ 为:

$$S_{\omega_j}^2 = \int_{\omega_1 \in A} \dots \int_{\omega_s \in A} \left(\frac{\partial \Omega(\omega)}{\partial \omega_j} \right)^2 d\Gamma(\omega_1) \dots d\Gamma(\omega_s) \quad (21)$$

该指数反映了新能源场站出力以及系统动态负荷 ω_j 对暂态电压稳定评估指标 S_{VDI} 的统计分布或加权函数的平方导数。

根据多项式的正交性, 对所有输入参数进行积分时, 式(21)可简化为:

$$S_{\omega_j}^2 = \sum_{k=0}^M c_k^2 \int_{\omega_j \in A} \left(\sum_{i=0}^{\alpha_j^k - 1} b_i^{(\alpha_j^k - 1)} P_j^{(i)}(\omega_j) \right)^2 d\Gamma(\omega_j) \quad (22)$$

该指数将 Sobol 指数推广到 aPC 环境, 并提供一种类似于灵敏性加权平方范数的全局灵敏度度量方法, 以反映新能源场站出力和动态负荷功率变化对系统暂态电压稳定性的影响。所提暂态电压全局

灵敏度不依赖于参数大小对系统暂态电压稳定性影响大小的比较, 是一个绝对度量, 是导数的定量表达式。与现有的 Sobol 指数相比, 该指数可作为系统暂态电压全局灵敏度的绝对衡量指标。

3.2 基于数据驱动的暂态电压全局灵敏度计算步骤

基于数据驱动的系统暂态电压全局灵敏度计算流程图如图 3 所示。由图 3 可知, 基于数据驱动的暂态电压稳定关键影响节点筛选方法包含如下步骤:

- 1) 考虑新能源发电间的相关性及其与动态负荷的不确定性, 根据 mvG copula 公式得到各个参数的输入序列。
- 2) 进行暂态时域仿真计算, 得到系统所有节点的暂态电压, 根据式(3)计算系统暂态电压稳定性指标 S_{VDI} 作为模型输出。
- 3) 根据输入参数序列以及暂态电压稳定性指标 S_{VDI} , 建立任意混沌多项式。

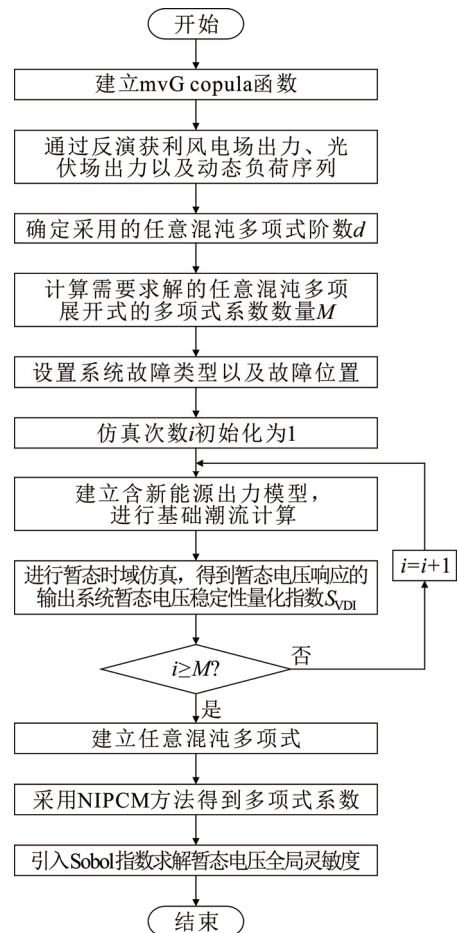


图 3 基于数据驱动的暂态电压全局灵敏度计算流程
Fig.3 Flowchart of data-driven global sensitivity calculation for transient voltages stability

4) 采用非侵入性概率配置方法计算多项式展开项的系数, 得到任意混沌多项式系数。

5) 根据式(22)计算系统暂态电压全局灵敏度。

6) 根据暂态电压全局灵敏度的大小, 对暂态电压稳定影响因素对系统暂态电压稳定性影响程度进行排序, 得到影响电力系统暂态电压稳定性的关键节点。

4 算例分析

本章分别在含多类型新能源和动态负荷的 IEEE 9 节点、IEEE 39 节点系统和中国电科院发布的 CSEE-VC 系统对所提方法进行验证。首先, 在 CloudPSS 电磁暂态仿真平台进行系统建模; 进一步, 进行电磁暂态仿真计算获得电压稳定结果数据; 最后, 使用 MATLAB 软件编写基于任意混沌多项式的暂态电压全局灵敏度程序对数据进行分析。动态负荷采用的是综合负荷模型, 新能源场站采用单机倍乘等值模型, 其中, 风电场建模参考文献[33], 光伏电站建模参考文献[34]。本文实验所需的模型搭建遵循标准化流程, 参数设置结合实际运行数据与标准测试系统进行校准, 确保模型能真实反映系统动态行为。

4.1 算例 1: 含多类型新能源和动态负荷的 IEEE 9 节点系统暂态电压稳定分析

该算例接线图如附录 A 图 A1 所示。其中, 节点 1 接入了风电场, 装机容量为 150 MW; 节点 2 接入了光伏电站, 装机容量为 90 MW; 系统中新能源和常规电源的装机比例为 1:1.3; 节点 4、7、9 接入了动态负荷。假设 6 s 时系统节点 8 处发生三相短路故障, 仿真时间为 8 s。此场景下, 电网电压跌落 0.3 pu 左右。

利用本文所提基于 aPC 的暂态电压稳定关键影响节点分析方法对考虑新能源修改的 IEEE 9 节点系统进行分析时, 选定 aPC 模型的输入参数包括 9 个不确定变量 $\mathbf{x}=[x_1, \dots, x_5]$, 如附录 A 表 A1 所示, 其中, x_1 为节点 1 风电场所注入功率, x_2 为节点 2 上光伏场站注入功率, x_3 、 x_4 、 x_5 分别为节点 4、7、9 处接入动态负荷; aPC 模型的输出为暂态电压稳定性指标 S_{VDI} ; aPC 模型阶数 d 取 2。

4.1.1 aPC 模型的拟合精度分析

对故障后 2 s 的仿真结果进行分析时, aPC 模型的统计参数(即多项式系数平均值及标准偏差分布情况)如图 4 所示。由图 4(a)可知, aPC 模型的平

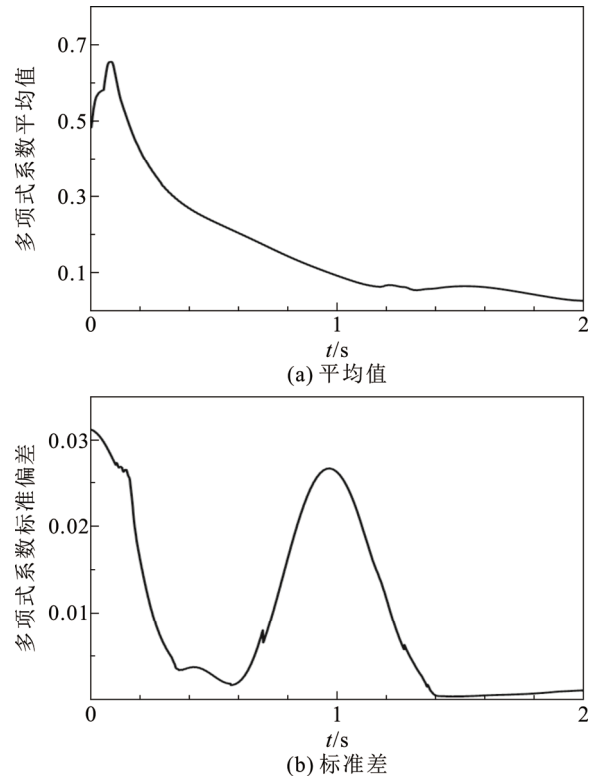


图 4 IEEE 9 节点系统新能源统计参考图

Fig.4 Reference diagram for new energy statistics of IEEE 9 system considering new energy modification

均值均 <0.7 ; 由图 4(b)可知, 标准偏差均 <0.035 。由此可知, 在该场景下, aPC 模型统计参数的均值和方差均 <1 [35], 表明所提出的多项式拟合方法在应用于修改的 IEEE 9 节点系统时, 具有较高的精度。

4.1.2 基于 aPC 的暂态电压稳定关键影响节点分析

在进行暂态电压稳定分析时, 除了本文方法外, 还将本文方法结果与考虑 1 000 个样本数的蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)灵敏度计算方法[36]以及 Fourier 幅度灵敏度计算(Fourier amplitude sensitivity test, FAST)方法[37]这 2 种全局灵敏度计算方法进行了对比。图 5 为上述 3 种方法计算出的暂态电压全局灵敏度结果。对比图 5(a)、(b)、(c)可知, 虽然计算的数值大小有差异, 但是 5 个参数的排序完全相同。对比图 5(b)和图 5(c)可知, 图 5(a)中参数的暂态电压稳定全局灵敏度间差异性更大, 更有利于发现系统中对暂态电压稳定性影响较大的因素。由图 5(a)可知, 系统中参数 4 与参数 5 的暂态电压全局灵敏度远大于另外 3 个参数, 而参数 1 和参数 2 的暂态电压全局灵敏度远小于另外 4 个参数。其中参数 5 的暂态电压全局灵敏度约为 0.8, 参数 4 的暂态电压全局灵敏度约为 0.6, 参数 1 的暂态电压全局灵

灵敏度约为0, 参数2的暂态电压全局灵敏度约为0.2。

值得一提的是, 故障后的不同时段内, 暂态电压的全局灵敏度存在轻微波动。为更清晰地对比各个参数对暂态电压稳定性的影响, 本节通过计算故障后 2 s 内的暂态电压全局灵敏度平均值, 分析各参数在该时间段内的总体影响。

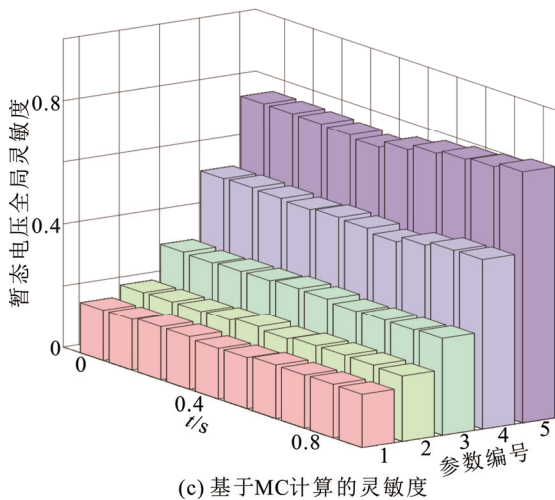
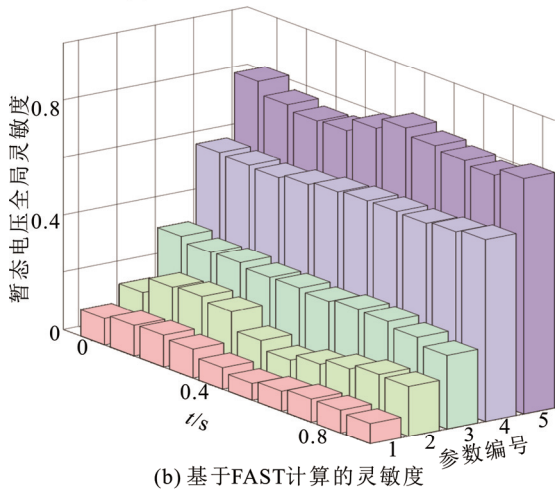
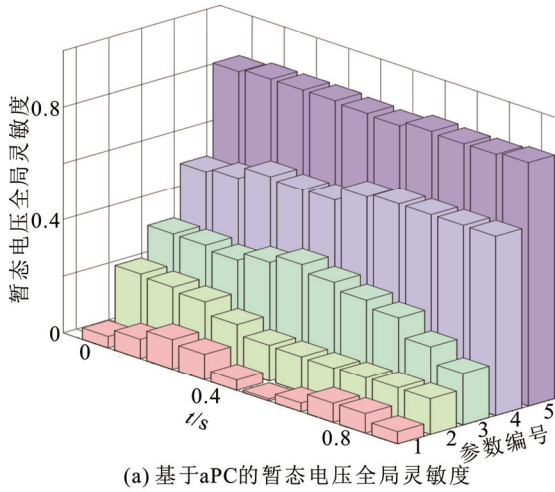


图5 算例1下3种方法的暂态电压全局灵敏度分布情况图

Fig.5 Global sensitivity distribution diagram of transient voltage for three methods in case 1

上述3种方法计算得到的暂态电压全局灵敏度平均值以及排序分别如附录A表A2、表A3和表A4。3种方法暂态电压灵敏度差异如表2所示。

由表2可知, 针对考虑新能源修改的IEEE 9节点系统, 各影响因素的暂态电压灵敏度大小可排序为: 近光伏电站的动态负荷(x_5)的暂态电压全局灵敏度最大, 近风电站的动态负荷(x_4)次之, 然后为近常规发电站的动态负荷(x_3), 最后为新能源场站注入功率。其中, 节点9处接入的动态负荷功率的暂态电压全局灵敏度远大于其他参数, 因此该节点处的动态负荷功率为影响系统暂态电压稳定的关键影响因素。

4.1.3 效率对比分析

在该场景下3种全局灵敏度方法的仿真次数如表3所示。其中, 由式(5)可计算得到多项式数量 $M=20$ 。对比3种方法的仿真次数, 该场景下基于aPC的暂态电压全局灵敏度计算方法的仿真次数远远小于另外2种方法。因此, 本文所提方法的计算效率更高。

4.2 算例2: 含多类型新能源和动态负荷的IEEE 39节点系统暂态电压稳定分析

该算例接线图如附录A图A2所示。其中, 节点30、34接入了光伏电站, 装机容量均为200 MW; 节点36、37接入了风电场, 装机容量均为400 MW; 系统中新能源和常规电源的装机比例为1:1.69; 节点30、31、34、36、37接入了动态负荷。

假设6 s时系统节点16处发生三相短路故障, 故障持续时间0.1 s, 仿真时间为8 s。此场景下, 电网电压跌落0.2 pu左右。

表2 3种计算暂态电压灵敏度方法的比较

Table 2 Comparison of three methods for calculating transient voltage sensitivity

| 参数 | 基于aPC排序 | 基于FAST排序 | 基于MC排序 |
|-------|---------|----------|--------|
| x_1 | 0.056 | 0.083 | 0.170 |
| x_2 | 0.152 | 0.170 | 0.210 |
| x_3 | 0.305 | 0.291 | 0.313 |
| x_4 | 0.601 | 0.608 | 0.532 |
| x_5 | 0.856 | 0.796 | 0.771 |

表3 算法1下3种暂态电压全局灵敏度方法的仿真次数

Table 3 Simulation times for the three global sensitivity methods of transient voltage in case 1

| 全局灵敏度计算方法 | aPC | MC | FAST |
|-----------|-----|-------|-------|
| 仿真次数 | 20 | 7 000 | 5 000 |

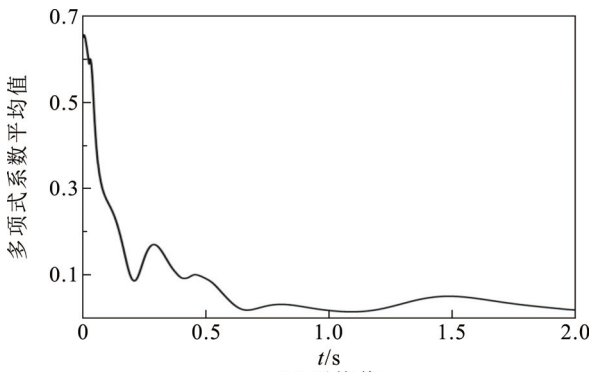
利用本文所提基于 aPC 的暂态电压稳定关键影响节点分析方法对考虑新能源修改的 IEEE 39 节点系统进行分析时, 选定 aPC 模型的输入参数包括 9 个不确定变量 $\mathbf{x}=[x_1, \dots, x_9]$, 如附录 A 表 A5 所示, 其中, $[x_1, x_2]$ 为节点 37 和节点 36 风电场所注入功率, $[x_3, x_4]$ 为节点 34 和节点 30 上光伏场站注入功率, $[x_5, x_6, x_7, x_8, x_9]$ 为节点 37、36、31、34、30 处接入负荷; aPC 模型的输出为暂态电压稳定性指标 S_{VDI} ; aPC 模型阶数 d 取 2。

4.2.1 aPC 模型的拟合精度分析

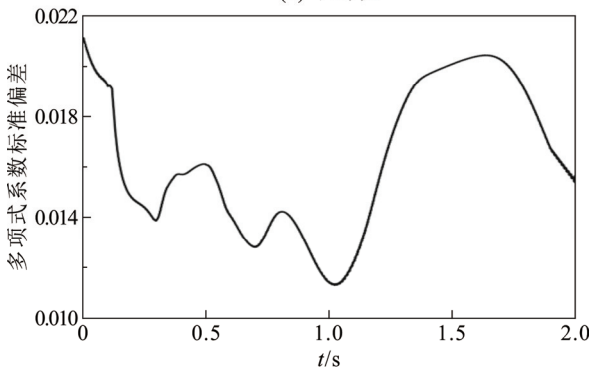
对故障后 2 s 的仿真结果进行分析时, aPC 模型的统计参数(即多项式系数平均值及标准偏差分布情况)如图 6 所示。由图 6(a)可知, aPC 模型的平均值均 <0.7 ; 由图 6(b)可知, 标准偏差均 <0.022 。由此可知, 在该场景下, aPC 模型统计参数的均值和方差均 <1 , 表明所提出的多项式拟合方法应用于考虑新能源修改的 IEEE 39 节点系统时, 具有较高的精度。

4.2.2 基于 aPC 的暂态电压稳定关键影响节点分析

在进行暂态电压稳定分析时, 除了本文方法外, 还将本文方法结果与考虑 1 000 个样本数的蒙特卡罗灵敏度计算方法^[30]以及傅里叶幅度灵敏度



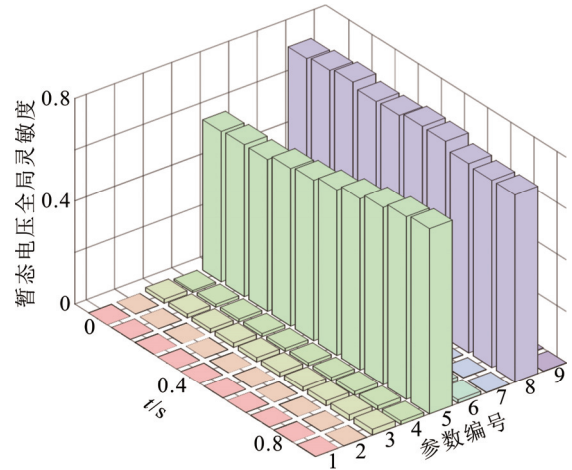
(a) 平均值



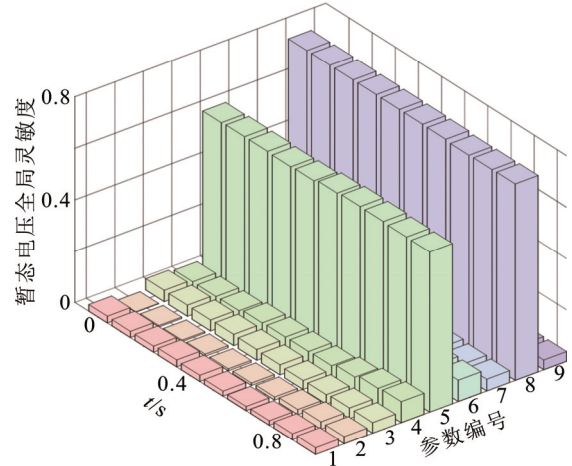
(b) 标准差

图 6 考虑新能源修改的 IEEE 39 节点系统新能源统计参数图
Fig.6 Reference diagram for new energy statistics of IEEE 39 system considering new energy modification

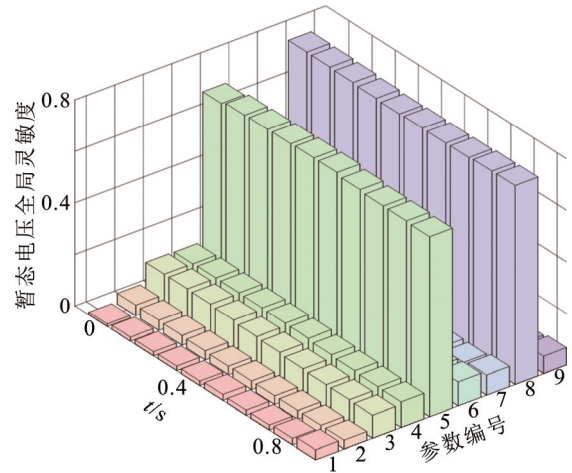
计算方法^[31]这 2 种全局灵敏度计算方法进行了对比。图 7 为上述 3 种方法计算出的暂态电压全局灵敏度结果。对比图 7(a)、(b)、(c)可知, 虽然计算的数值大小有差异, 但差异较小且参数大小的排序大致相同。对比图 7(b)和图 7(c)可知, 图 7(a)中参数



(a) 基于aPC的暂态电压全局灵敏度



(b) 基于FAST计算的灵敏度



(c) 基于MC计算的灵敏度

图 7 算例 2 下 3 种方法暂态电压全局灵敏度分布情况图
Fig.7 Global sensitivity distribution diagram of transient voltage for three methods in case 2

的暂态电压稳定全局灵敏度间差异性更大, 更有利于发现系统中对暂态电压稳定性影响较大的因素。由图 7(a)所知, 系统中参数 8 与参数 5 的暂态电压全局灵敏度远大于另外 7 个参数, 而参数 1 和参数 2 的暂态电压全局灵敏度远小于另外 7 个参数。其中参数 8 的暂态电压全局灵敏度约为 0.7, 参数 5 的暂态电压全局灵敏度约为 0.6, 参数 1 和参数 2 的暂态电压全局灵敏度约为 0。

上述 3 种方法计算得到的暂态电压全局灵敏度平均值以及排序分别如附录 A 表 A5、表 A6 和表 A7。3 种方法暂态电压灵敏度差异以及排序比较如表 4 所示。

由表 4 可知, 针对考虑新能源修改的 IEEE 39 节点系统, 各影响因素的暂态电压灵敏度大小可排序为: 接在新能源上的动态负荷暂态电压全局灵敏度最大, 未接在新能源上的动态负荷次之, 然后为光伏注入功率, 最后为风电场注入功率。其中, 节点 32 处接入的动态负荷功率的暂态电压全局灵敏度远大于其他参数, 因此, 该节点为影响系统暂态电压稳定的关键影响节点, 该节点处的动态负荷功率为影响系统暂态电压稳定的关键影响因素。

在 IEEE 9 节点系统以及 IEEE 39 节点系统 2 个场景中, 本文方法计算的暂态电压全局灵敏度值分布表现出更显著的差异性, 能够清晰地突出关键影响节点。在 IEEE 9 节点系统中, aPC 方法计算的灵敏度值间差异较大, 这种显著的差异性明确反映了不同因素对系统暂态电压稳定性的影响程度。在 IEEE 39 节点系统中, 随着系统规模和复杂度的增加, 暂态电压全局灵敏度的差异性有所减小, 但本文方法仍能够突出关键影响节点, 例如参数 x_8 (节点 30 动态负荷)的灵敏度值为 0.75, 而参数 x_1 (风电注入功率)的灵敏度值约为 0。相比之下, MC 和 FAST 方法的灵敏度值分布更加平滑, 尤其是在 IEEE 39 节点系统中, 灵敏度值之间的差异进一步减弱, 降低了对关键影响节点的突出能力。

总体而言, 本文方法在排序上与 MC 和 FAST 方法保持一致, 但其暂态电压全局灵敏度更能反映各因素对系统暂态电压稳定的影响。

4.2.3 效率对比分析

在该场景下 3 种全局灵敏度方法的仿真次数如表 5 所示。其中, 由式(5)可知, 多项式数量 $M=54$ 。对比 3 种方法的仿真次数, 基于 aPC 的暂态电压全局灵敏度计算方法的仿真次数远小于另外 2 种方

表 4 算例 2 下 3 种方法暂态电压灵敏度排序比较

Table 4 Comparison of transient voltage sensitivity rankings of three methods in case 2

| 参数 | 基于 aPC 排序 | 基于 FAST 排序 | 基于 MC 排序 |
|-------|-----------|------------|----------|
| x_1 | 8 | 8 | 8 |
| x_2 | 9 | 9 | 9 |
| x_3 | 3 | 6 | 5 |
| x_4 | 5 | 4 | 3 |
| x_5 | 2 | 2 | 2 |
| x_6 | 6 | 3 | 4 |
| x_7 | 4 | 5 | 6 |
| x_8 | 1 | 1 | 1 |
| x_9 | 7 | 7 | 7 |

表 5 算例 2 下 3 种暂态电压全局灵敏度方法的仿真次数

Table 5 Simulation times for the three global sensitivity methods of transient voltage in case 2

| 全局灵敏度计算方法 | aPC | MC | FAST |
|-----------|-----|--------|-------|
| 仿真次数 | 54 | 11 000 | 9 000 |

法, 因此本文所提方法的计算效率更高。

综上所述, 基于 aPC 的暂态电压全局灵敏度计算方法相较于其他 3 种方法, 准确度更高。同时, 在该场景下基于 aPC 的方法只需要进行 54 次暂态时域仿真, 远小于其他 2 种方法的仿真次数, 其计算效率远高于其他 2 种方法。

对于 IEEE 9 节点系统, aPC 方法仅需 20 次仿真, 而 MC 和 FAST 方法分别需要 7 000 次和 5 000 次仿真; 对于 IEEE 39 节点系统, aPC 方法需 54 次仿真, 而 MC 和 FAST 方法分别需 11 000 次和 9 000 次仿真。这表明, 基于 aPC 的方法在分析更大规模、更复杂场景的电力系统暂态电压稳定关键影响节点时, 计算效率优势愈加突出。

4.3 算例 3: 含高比例新能源的交直流混联系统暂态电压稳定分析

本文采用中国电科院电压崩溃(CSEE-VC)系统进行仿真分析。该算例接线图如附录 A 图 A3 所示。CSEE-VC 为含新能源接入的直流馈入系统, 为中国某 2 省实际系统通过节点合并等手段实现的等值系统, 共有 100 节点, 其中 500 kV 主网架有 32 节点; 新能源(240 万 kW)与常规能源(630 万 kW)装机比例为 1:2.62; 基本运行方式为新能源发电 180 万 kW(风电 120 万 kW、光伏 60 万 kW), 常规机组发电 386 万 kW; 系统内一回直流, 直流受入功率为 80 万 kW, 系统中包含 20 个负荷, 均采用动态负荷

模型。为了验证本文所提方法适用于各种场景,在本算例上设置 2 种故障类型进行仿真实验。故障类型具体设置如下:(1)交流线路三永 $N-1$ 故障:故障设置在 500 kV 交流线路上,故障位置设置为 0;(2)交流线路三永 $N-2$ 故障:故障设置在交流线路的双回输电线上。其中,附录 B 给出了 CSEE-VC 在交流线路三永 $N-2$ 故障下的仿真实验。

假设 6 s 时在节点 17 到节点 21 的 500 kV 交流线路上发生三永 $N-21$ 故障,故障持续时间 0.15 s。仿真时间为 8 s。此场景下,电网电压跌落 0.15 pu 左右。

4.3.1 aPC 模型的拟合精度分析

在对故障后 1 s 的仿真结果进行分析时,aPC 模型的统计参数(即多项式系数平均值及标准偏差分布情况)如图 8 所示。由图 8(a)可知,aPC 模型的平均值均 <0.8 ;由图 8(b)可知,标准偏差均 <0.07 。由此可知,在该场景下,aPC 模型统计参数的均值和方差均 <1 ,表明所提出的多项式拟合方法在应用于 CSEE-VC 系统时,具有较高精度。

4.3.2 基于 aPC 的暂态电压稳定关键影响节点分析

图 9(a)、(b)、(c)为基于 aPC 的暂态电压全局灵敏度计算方法应用于 CSEE-VC 系统计算出的结果,展示了 33 个参数的暂态电压全局灵敏度分布情况。图 9(a)为参数 1—6(即风电场注入功率)的暂态电压全局灵敏度,这 6 个参数的暂态电压灵敏度在故障后 1 s 的大小变化趋势基本一致,均分布在(0.015, 0.005)区间内。图 9(b)为参数 7—12(即光伏电站注入功率)在故障后 1 s 的暂态电压全局灵敏度,这 6 个参数的大小差异比较大。其中,参数 7 和参数 9 的暂态电压全局灵敏度远小于其他 4 个参数,分布在(0.04, 0.06)区间内,而另外 4 个参数大致分布在(0.1, 0.22)区间内。图 9(c)为参数 13—33(即动态负荷功率)在故障后 1 s 的暂态电压全局灵敏度。其中,参数 14 最小,分布在 0.09 左右;参数 25 最大,分布在(0.2, 0.35)内。对比图 9(a)、(b)、(c)可知,动态负荷和光伏电站注入功率的暂态电压全局灵敏度远大于风电场注入功率暂态电压全局灵敏度。

图 10 为这 33 个参数的暂态电压全局灵敏度平均值以及排序。由图 10 可知,暂态电压全局灵敏度大小排序为:动态负荷的暂态电压全局灵敏度最大,光伏电站注入功率次之,最后为风电场注入功率。其中,负荷 13 的暂态电压全局灵敏度在这 33 个参数之中最大,因此该节点为三永 $N-1$ 故障下影响 CSEE-VC 系统暂态电压稳定的关键节点,该节点的

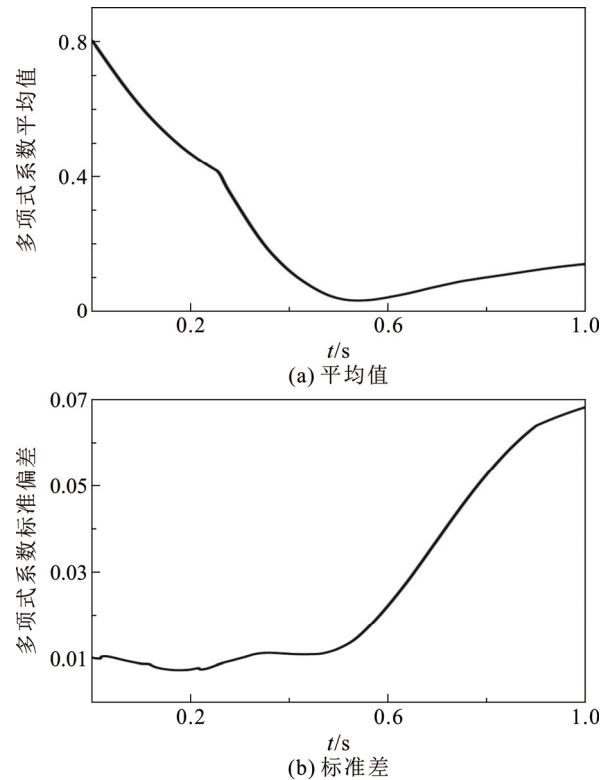


图 8 CSEE-VC 的新能源统计参数

Fig.8 Reference diagram for new energy statistics of CSEE-VC system

动态负荷功率是影响系统暂态电压稳定的关键因素。

由 2 种故障类型下各参数灵敏度对比结果可知, $N-2$ 故障场景下的参数平均值范围为 0.025(x_5)~0.494(x_{25}), $N-1$ 故障场景下的参数平均值范围为 0.005 7(x_5)~0.28(x_{25})。从排序来看, $N-2$ 场景的参数排名从 1(x_{25})至 33(x_5), $N-1$ 场景的排名同样从 1(x_{25})至 33(x_5),反映出部分参数在 2 种场景下的重要性具有一致性,例如 x_{25} 、 x_{30} 和 x_{21} ,其在 2 种场景下的平均值和排名均处于较高水平,是影响系统暂态电压稳定性的关键影响节点。

与此同时,一些参数在 2 种故障场景中的表现差异较大,显示出场景变化对其敏感性的影响。例如, x_{32} 在 $N-2$ 场景中排名第 7,但在 $N-1$ 场景中下降至第 22; x_{10} 在 $N-2$ 场景中排名第 19,而在 $N-1$ 场景中上升至第 10。上述变化表明,这些参数对系统暂态电压稳定的影响可能受到特定场景条件的显著调制,值得进一步深入研究。

此外,部分参数如 x_5 、 x_2 的平均值和排名均处于最低水平,分别为 0.025 和 0.029($N-2$ 平均值)、0.005 7 和 0.006 8($N-1$ 平均值),其排序在 2 种场景中均为倒数,表明其对系统暂态电压稳定的影响较

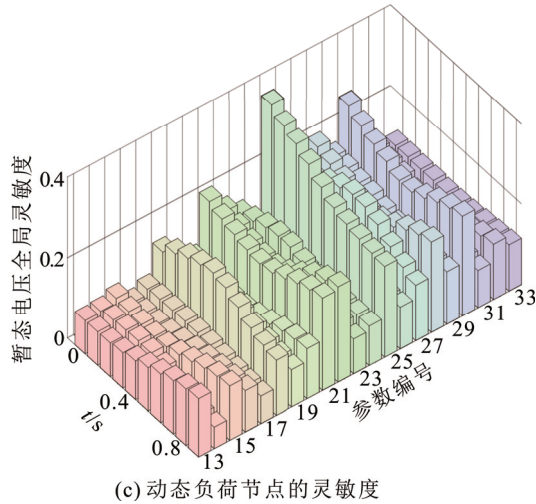
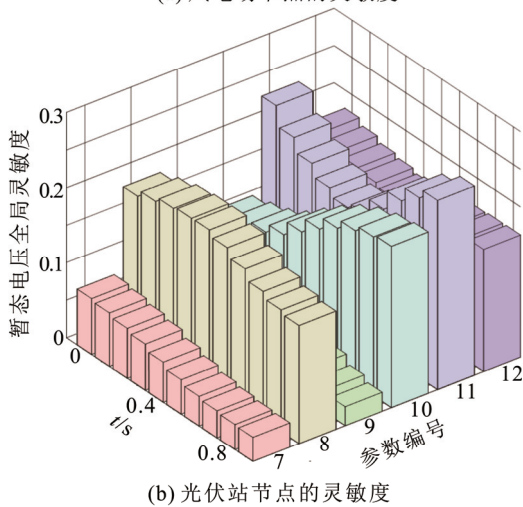
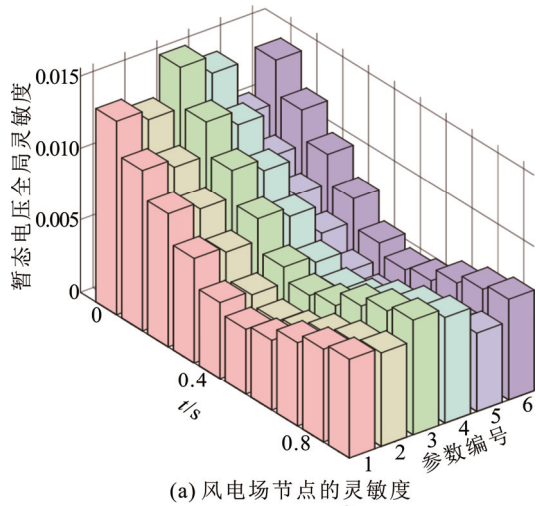


图9 CSEE-VC 系统中参数的暂态电压全局灵敏度
Fig.9 Global sensitivity of transient voltage of parameters in CSEE-VC system

小。在后续分析中, 这类参数可适当简化。

5 结论

本文提出一种基于数据驱动的新能源电力系

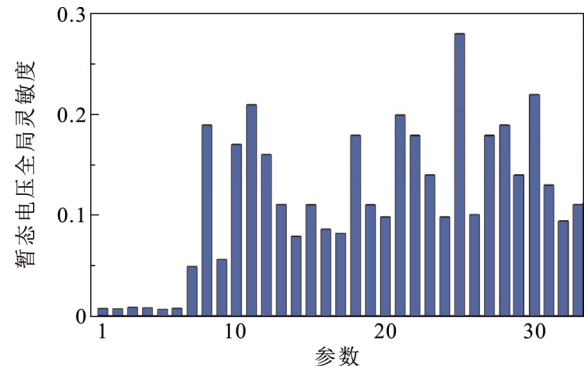


图10 CSEE-VC 系统的暂态电压全局灵敏度平均值
Fig.10 Mean of global sensitivity of transient voltage of parameters in CSEE-VC system

统暂态电压稳定关键影响节点筛选方法, 并分别在考虑新能源修改的 IEEE 9 节点、IEEE 39 节点系统以及 CSEE-VS 系统进行仿真验证, 相关结论如下:

1) 本文以系统中暂态电压稳定的影响因素为输入参数, 以系统电压偏差指数为模型输出, 并采用任意混沌多项式准确快速地拟合了系统暂态电压稳定性与系统电压稳定影响因素之间的关联关系。

2) 本文将 Sobol 指数推广到 aPC 环境, 提出了一种暂态电压全局灵敏度的计算方法, 准确地量化了新能源场站出力和动态负荷变化对系统暂态电压稳定性的影响程度。

3) 仿真结果表明, 在所研究的新能源电力系统中, 动态负荷功率对系统暂态电压稳定性的影响最大, 光伏电站注入功率的影响次之, 风电站注入功率的影响最小。后续研究可将本文识别的关键影响节点应用于系统电压稳定性的控制策略优化、新能源厂站选址定容和低压减载策略的制定中。

附录见本刊网络版(<http://hve.epri.sgcc.com.cn>)。

参考文献 References

- [1] 汤涌, 仲悟之, 孙华东, 等. 电力系统电压稳定机理研究[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 24-29.
TANG Yong, ZHONG Wuzhi, SUN Huadong, et al. Study on mechanism of power system voltage stability[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 24-29.
- [2] 毛安家, 马静, 蒯圣宇, 等. 高比例新能源替代常规电源后系统暂态稳定与电压稳定的演化机理[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2745-2756.
MAO Anjia, MA Jing, KUAI Shengyu, et al. Evolution mechanism of transient and voltage stability for power system with high renewable penetration level[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2745-2756.
- [3] 王渝红, 朱伶俐, 赏成波, 等. 电力系统暂态电压稳定评估的混合

- 智能特征双重筛选方法[J]. 电网技术, 2024, 48(4): 1532-1542.
- WANG Yuhong, ZHU Lingli, SHANG Chengbo, et al. Hybrid intelligent dual feature screening method for transient voltage stability assessment of power system[J]. Power System Technology, 2024, 48(4): 1532-1542.
- [4] 张芸烽, 林舜江, 杨悦荣, 等. 考虑新能源高阶不确定性的交直流混联电网静态电压稳定裕度计算[J]. 高电压技术, 2024, 50(4): 1631-1644.
- ZHANG Yunfeng, LIN Shunjiang, YANG Yuerong, et al. Calculation of static voltage stability margin for AC/DC hybrid power system considering the high-order uncertainty of renewable energy[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(4): 1631-1644.
- [5] 杨晓明. 高比例新能源电力系统电压稳定研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- YANG Xiaoming. Study on voltage stability of high-proportion new energy power system[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2020.
- [6] 朱益华, 饶宏, 郭琦, 等. 改善局部电网暂态电压稳定特性的LCC-HVDC控制策略优化[J]. 高电压技术, 2024, 50(7): 2809-2819.
- ZHU Yihua, RAO Hong, GUO Qi, et al. Optimization of LCC-HVDC control strategy for improving transient voltage stability characteristics of partial power grids[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 2809-2819.
- [7] 兰天楷, 孙华东, 徐式蕴, 等. 新能源低电压穿越主导的电力系统暂态电压失稳机理分析[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(12): 58-67.
- LAN Tiankai, SUN Huadong, XU Shiyun, et al. Mechanism analysis of power system transient voltage instability dominated by low voltage ride-through of renewables[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(12): 58-67.
- [8] 郑超, 李媛, 吕盼, 等. 规模化光伏并网对暂态稳定影响及应对措施[J]. 高电压技术, 2017, 43(10): 3403-3411.
- ZHENG Chao, LI Yuan, LÜ Pan, et al. Influence of large-scaled photovoltaic grid connected on the transient stability and countermeasures[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3403-3411.
- [9] 于珍, 沈沉, 张雪敏. 双馈风机故障穿越后功率恢复速率对系统暂态稳定的影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(13): 3781-3791.
- YU Zhen, SHEN Chen, ZHANG Xuemin. Analysis on the impact of post-fault power recovery speed of doubly-fed induction generators on power system transient stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 39(12): 3781-3791.
- [10] 陈磊, 刘永奇, 戴远航, 等. 电力电子接口新能源并网的暂态电压稳定机理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 15-21.
- CHEN Lei, LIU Yongqi, DAI Yuanhang, et al. Study on the mechanism of transient voltage stability of new energy source with power electronic interface[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 15-21.
- [11] 潘雄, 刘文霞, 徐玉琴, 等. 基于SRSM和Nataf方法的含风电场群电力系统暂态稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 56-62.
- PAN Xiong, LIU Wenxia, XU Yuqin, et al. Transient stability analysis of power system integrated with wind farm groups based on SRSM and Nataf method[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 56-62.
- [12] KAWABE K, TANAKA K. Impact of dynamic behavior of photovoltaic power generation systems on short-term voltage stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3416-3424.
- [13] EFTEKHARNEJAD S, VITTAL V, HEYDT G T, et al. Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 893-901.
- [14] KAWABE K, OTA Y, YOKOYAMA A, et al. Novel dynamic voltage support capability of photovoltaic systems for improvement of short-term voltage stability in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 1796-1804.
- [15] 李升, 卫志农, 孙国强, 等. 大型光伏电站接入多机系统暂态电压稳定性研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(12): 3356-3362.
- LI Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Stability research of transient voltage for multi-machine power systems integrated large-scale PV power plant[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2018, 39(12): 3356-3362.
- [16] CHI Y, XU Y, ZHANG R. Many-objective robust optimization for dynamic VAR planning to enhance voltage stability of a wind-energy power system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1): 30-42.
- [17] 鲍海波, 韦化. 考虑风电的电压稳定概率评估的随机响应面法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 77-85.
- BAO Haibo, WEI Hua. A stochastic response surface method for probabilistic evaluation of the voltage stability considering wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 77-85.
- [18] 李文沅, 卢继平. 暂态电压稳定概率评估的蒙特卡罗方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 18-23.
- LI Wenyuan, LU Jiping. Monte Carlo method for probabilistic transient stability assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 18-23.
- [19] 王成山, 王兴刚, 孙玮. 含大型风电场的电力系统概率最大输电能力快速计算[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 56-62.
- WANG Chengshan, WANG Xinggang, SUN Wei. Fast calculation and analysis of probabilistic total transfer capability in power system including large-scale wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 56-62.
- [20] 陈为化, 江全元, 曹一家, 等. 电力系统电压崩溃风险评估[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 6-11.
- CHEN Weihua, JIANG Quanyuan, CAO Yijia, et al. Risk assessment of voltage collapse in power system[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 6-11.
- [21] MA Z X, CHEN H, CHAI Y L. Analysis of voltage stability uncertainty using stochastic response surface method related to wind farm correlation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(3): 1-9.
- [22] YE K T, ZHAO J B, HUANG C, et al. A data-driven global sensitivity analysis framework for three-phase distribution system with PVs[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4809-4819.
- [23] VENKATASUBRAMANIAN V, SCHATTLER H, ZABORSKY J. Dynamics of large constrained nonlinear systems—a taxonomy theory[power system stability][J]. Proceedings of the IEEE, 1995, 83(11): 1530-1561.
- [24] 刘斌, 陈磊, 闵勇. 考虑暂态电压稳定的低压减载地点选择[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(5): 11-14.
- LIU Bin, CHEN Lei, MIN Yong. Determination of the location of under-voltage load shedding considering transient voltage stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(5): 11-14.
- [25] FAN M, VITTAL V, HEYDT G T, et al. Probabilistic power flow studies for transmission systems with photovoltaic generation using cumulants[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2251-2261.
- [26] XIU D B, KARNIADAKIS G E. The wiener—Askey polynomial chaos for stochastic differential equations[J]. Scientific Computing, 2002, 24(2): 619-644.

- [27] GUO T Y, MILANOVIĆ J V. Probabilistic framework for assessing the accuracy of data mining tool for online prediction of transient stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 377-385.
- [28] SHI T, YU R Y, ZHU L Z, et al. Power system probabilistic production simulation containing large-scale wind power and photovoltaic power[C]//2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Hong Kong, China: IEEE, 2013: 1-6.
- [29] PREECE R, MILANOVIĆ J V. Tuning of a damping controller for multiterminal VSC-HVDC grids using the probabilistic collocation method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 318-326.
- [30] KRISHNAN V, MCCALLEY J D, HENRY S, et al. Efficient database generation for decision tree based power system security assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2319-2327.
- [31] BENESTY J, CHEN J D, HUANG Y T. On the importance of the pearson correlation coefficient in noise reduction[J]. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2008, 16(4): 757-765.
- [32] SIEBERT W M. Circuits, signals, and systems[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1985.
- [33] 秦 垚, 王 晗, 邓桢彦, 等. 自同步电压源永磁直驱风电机组的直流电压同步机制及其统一控制结构[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 31-41.
QIN Yao, WANG Han, DENG Zhenyan, et al. synchronization mechanism and unified control structure for PMSG-based WTGs by using the DC-link voltage to realize self-synchronous voltage source control[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 31-41.
- [34] 葛津铭, 刘英儒, 庞 丹, 等. 含高渗透率光伏配电网的集群划分电压控制策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 74-82.
GE Jinming, LIU Yingru, PANG Dan, et al. Cluster division voltage control strategy of photovoltaic distribution network with high permeability[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 74-82.
- [35] ZHANG Y C, XU Y, DONG Z Y, et al. Real-time assessment of fault-induced delayed voltage recovery: a probabilistic self-adaptive data-driven method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2485-2494.
- [36] 赵建伟, 李禹鹏, 杨增辉, 等. 基于拟蒙特卡罗模拟和核密度估计的概率静态电压稳定计算方法[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3833-3839.
ZHAO Jianwei, LI Yupeng, YANG Zenghui, et al. Probabilistic static voltage stability calculation based on quasi-Monte Carlo and kernel density estimation[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3833-3839.
- [37] FOCK E. Global sensitivity analysis approach for input selection and system identification purposes—a new framework for feedforward neural networks[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 25(8): 1484-1495.



WANG Yuhong
Ph.D., Professor

王渝红

1971—, 女, 博士, 教授, 博导
主要研究方向为高压直流输电、电力系统和稳定与控制、新能源并网
E-mail: yuhongwang@scu.edu.cn



GAO Shilin
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

高仕林(通信作者)

1994—, 男, 博士, 副研究员
主要从事电力系统电磁暂态建模仿真和电力系统稳定与控制方面的研究工作
E-mail: gaoshilin@scu.edu.cn

收稿日期 2024-11-26 修回日期 2025-04-24 编辑 程子丰

附录 A

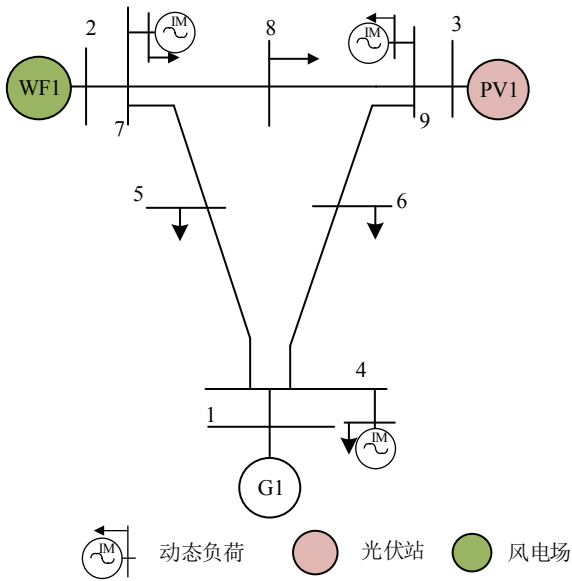


图 A1 修改后的 IEEE 9 系统接线图

Fig.A1 Schematic diagram of modified IEEE 9 system

表 A1 修改后的 IEEE 9 系统中的输入参数

Table A1 Input parameters in the modified IEEE 9 system

| 输入参数种类 | 风电出力 | 光伏出力 | 动态负荷 |
|--------|-------|-------|-----------------|
| 节点 | 1 | 2 | 4,7,9 |
| 参数编号 | x_1 | x_2 | x_3, x_4, x_5 |

表 A2 基于 aPC 暂态电压全局灵敏度平均值以及排序

Table A2 Average value and ranking of global sensitivity of transient voltage based on aPC

| 参数编号 | 平均值 | 排序 |
|-------|-------|----|
| x_1 | 0.056 | 5 |
| x_2 | 0.152 | 4 |
| x_3 | 0.305 | 3 |
| x_4 | 0.601 | 2 |
| x_5 | 0.856 | 1 |

表 A3 基于 FAST 暂态电压全局灵敏度平均值以及排序

Table A3 Average value and ranking of global sensitivity of transient voltage based on FAST

| 参数编号 | 平均值 | 排序 |
|-------|-------|----|
| x_1 | 0.083 | 5 |
| x_2 | 0.170 | 4 |
| x_3 | 0.291 | 3 |
| x_4 | 0.608 | 2 |
| x_5 | 0.796 | 1 |

表 A4 基于 MC 暂态电压全局灵敏度平均值以及排序

Table A4 Average value and ranking of global sensitivity of transient voltage based on MC

| 参数编号 | 平均值 | 排序 |
|-------|-------|----|
| x_1 | 0.170 | 5 |
| x_2 | 0.210 | 4 |
| x_3 | 0.313 | 3 |
| x_4 | 0.532 | 2 |
| x_5 | 0.771 | 1 |

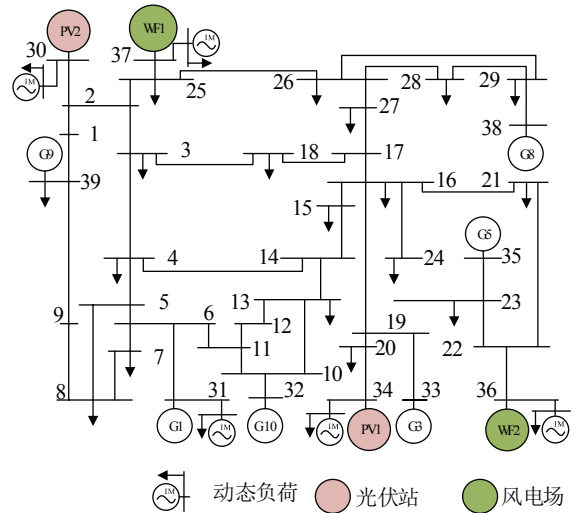


图 A2 修改后的 IEEE 39 系统接线图

Fig.A2 Schematic diagram of modified IEEE 39 system

表 A5 修改后的 IEEE 39 系统中的输入参数

Table A5 Input parameters in the modified IEEE 39 system

| 输入参数种类 | 风电出力 | 光伏站出力 | 动态负荷 |
|--------|------------|------------|---------------------------|
| 节点 | 37, 36 | 34, 30 | 37, 36, 31, 34, 30 |
| 参数编号 | x_1, x_2 | x_3, x_4 | x_5, x_6, x_7, x_8, x_9 |

表 A6 算例 2 中基于 aPC 暂态电压全局灵敏度平均值以及排序

Table A6 Average value and ranking of global sensitivity of transient voltage based on aPC in case2

| 参数 | 平均值 | 排序 |
|-------|------------------------|----|
| x_1 | 2.50×10^{-24} | 8 |
| x_2 | 3.60×10^{-24} | 9 |
| x_3 | 0.019 | 3 |
| x_4 | 0.012 | 5 |
| x_5 | 0.68 | 2 |
| x_6 | 0.011 | 6 |
| x_7 | 0.001 3 | 4 |
| x_8 | 0.75 | 1 |
| x_9 | 0.003 4 | 7 |

表 A7 算例 2 中基于 FAST 暂态电压全局灵敏度平均值以及排序

Table A7 Average value and ranking of global sensitivity of transient voltage based on FAST in case2

| 参数 | 平均值 | 排序 |
|-------|-------|----|
| x_1 | 0.027 | 8 |
| x_2 | 0.017 | 9 |
| x_3 | 0.042 | 6 |
| x_4 | 0.069 | 4 |
| x_5 | 0.620 | 2 |
| x_6 | 0.092 | 3 |
| x_7 | 0.054 | 5 |
| x_8 | 0.770 | 1 |
| x_9 | 0.041 | 7 |

表 A8 算例 2 中基于 MC 暂态电压全局灵敏度平均值以及排序

Table A8 Average value and ranking of global sensitivity of transient voltage based on MC in case2

| 参数 | 平均值 | 排序 |
|-------|-------|----|
| x_1 | 0.025 | 8 |
| x_2 | 0.028 | 9 |
| x_3 | 0.089 | 5 |
| x_4 | 0.100 | 3 |
| x_5 | 0.700 | 2 |
| x_6 | 0.097 | 4 |
| x_7 | 0.074 | 6 |
| x_8 | 0.760 | 1 |
| x_9 | 0.053 | 7 |

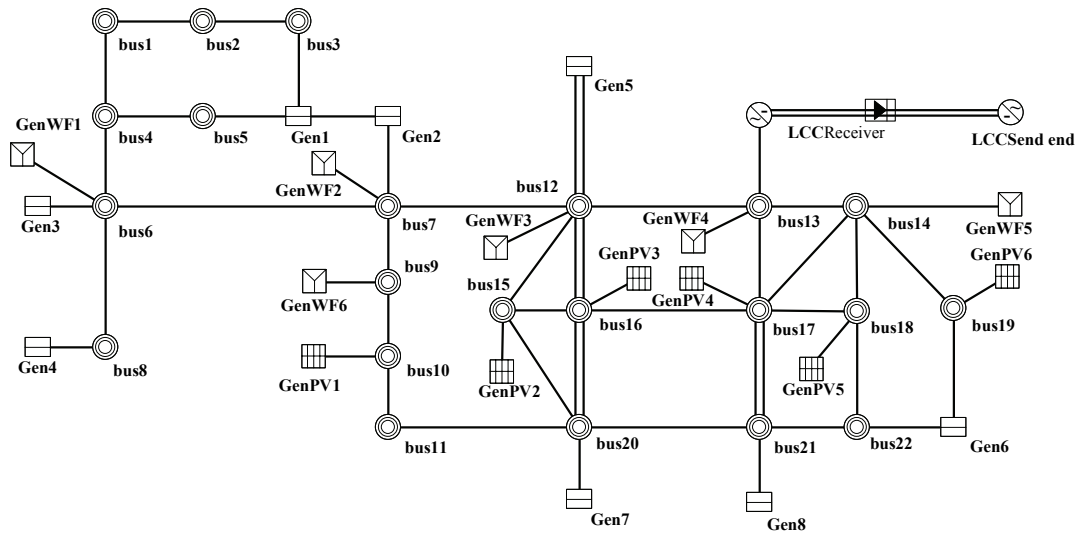


图 A3 CSEE-VC 系统总体接线图

Fig.A3 Schematic diagram of CSEE-VC system

表 A9 CSEE-VC 系统中的输入参数

Table A9 Input parameters in the CSEE-VC system

| 输入参数种类 | 风电出力 | 光伏电站出力 | 动态负荷 |
|--------|-----------|--------------|------------------------------|
| 节点 | WF1—WF6 | PV1—PV6 | 1, 10-19, 2, 20-22, 3-5, 7-9 |
| 参数编号 | $x_1—x_6$ | $x_7—x_{12}$ | $x_{13}—x_{33}$ |

附录 B

假设 6 s 时 CSEE-VC 在 500 kV 节点 12 到节点 16 的 500 kV 交流线路发生三永 $N-2$ 故障，故障持续时间 0.02 s，接地电阻为 10 Ω 。仿真时间为 8 s。此场景下，电网电压跌落 0.25 pu 左右。

附录 B1——aPC 模型的拟合精度分析

在对故障后 2 s 的仿真结果进行分析时，aPC 模型的统计参数(即多项式系数平均值及标准偏差

分布情况)，如图 B1 所示。由图 B1(a)可知，aPC 模型的平均值均 <0.7 ；由图 B1(b)可知，标准偏差均 <0.025 。由此可知，在该场景下，aPC 模型统计参数的均值和方差均 <1 ，表明所提出的多项式拟合方法在应用于三永 $N-2$ 故障下的 CSEE-VC 系统时，具有较高精度。

附录 B2——基于 aPC 的暂态电压稳定关键影响节点分析

图 B2(a)、(b)、(c)为基于 aPC 的暂态电压全局灵敏度计算方法应用于本场景下计算出的结果，展示了 33 个参数的暂态电压全局灵敏度的分布情况。图 B2(a)为参数 1-6(即风电场注入功率)的暂态电压全局灵敏度，这 6 个参数的暂态电压灵敏度在故障后 1 s 的大小变化趋势基本一致，均分布在(0.02, 0.01)区间内。图 B2(b)为参数 7—12(即光伏电站注入

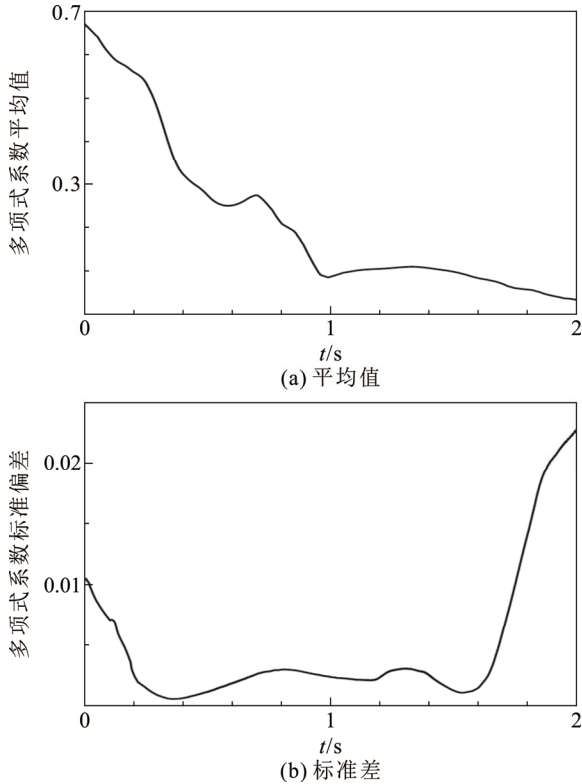
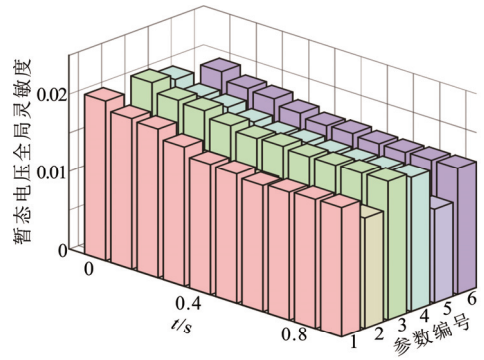


图 B1 CSEE-VC 的新能源统计参数

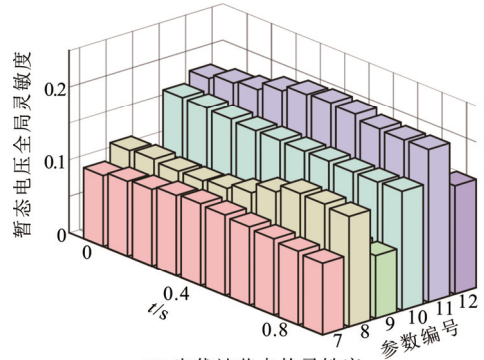
Fig.B1 Reference diagram for new energy statistics of CSEE-VC system

功率)在故障后 1 s 的暂态电压全局灵敏度,这 6 个参数的大小差异比较大。其中,参数 8、9 和 10 的暂态电压全局灵敏度大于其他 3 个参数,分布在 (0.1, 0.2) 区间内,而另外 3 个参数大致分布在 (0.05, 0.1) 区间内。图 A3(c) 为参数 13—33(即动态负荷功率)在故障后 1 s 的暂态电压全局灵敏度。其中,参数 14 最小,分布在 0.1 左右;参数 25 最大,分布在 (0.3, 0.65) 内。对比图(a)、(b)、(c)可知,动态负荷和光伏站注入功率的暂态电压全局灵敏度远大于风电场注入功率暂态电压全局灵敏度的大小。

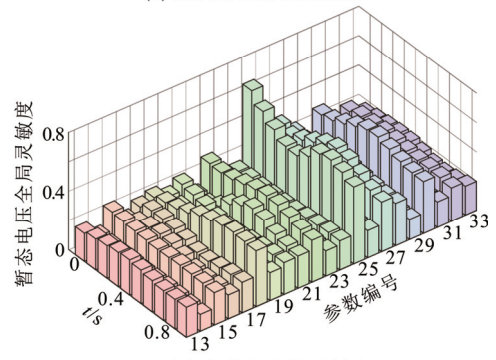
图 B3 为这 33 个参数的暂态电压全局灵敏度平均值以及排序。由图 B3 可知,暂态电压全局灵敏度大小排序为:动态负荷的暂态电压全局灵敏度最大,光伏站注入功率次之,最后为风电场注入功率。其中,负荷 13 的暂态电压全局灵敏度在这 33 个参数之中最大,因此该节点处的动态负荷功率为该场景下暂态电压稳定的关键影响因素。



(a) 风电场节点的灵敏度



(b) 光伏站节点的灵敏度



(c) 动态负荷节点的灵敏度

图 B2 CSEE-VC 系统中参数的暂态电压全局灵敏度

Fig.B2 Global sensitivity of transient voltage of parameters in CSEE-VC system

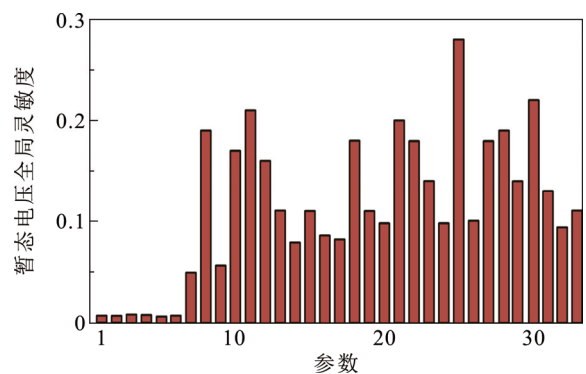


图 B3 暂态电压全局灵敏度平均值

Fig.B3 Mean of global sensitivity of transient voltage of parameters in CSEE-VC system

表 B1 2 种故障设置的暂态电压灵敏度排序比较

Table B1 Comparison of transient voltage sensitivity ranking
under two types of faults

| 参数编号 | 故障 N-2 平均值 | 故障 N-2 排序 | 故障 N-1 平均值 | 故障 N-1 排序 |
|----------|------------|-----------|------------|-----------|
| x_1 | 0.034 | 30 | 0.007 2 | 31 |
| x_2 | 0.029 | 32 | 0.006 8 | 32 |
| x_3 | 0.037 | 28 | 0.008 3 | 28 |
| x_4 | 0.036 | 29 | 0.007 6 | 29 |
| x_5 | 0.025 | 33 | 0.005 7 | 33 |
| x_6 | 0.034 | 31 | 0.007 3 | 30 |
| x_7 | 0.104 | 26 | 0.049 | 27 |
| x_8 | 0.130 | 24 | 0.098 | 20 |
| x_9 | 0.088 | 27 | 0.056 | 26 |
| x_{10} | 0.166 | 19 | 0.170 | 10 |
| x_{11} | 0.215 | 11 | 0.180 | 7 |
| x_{12} | 0.137 | 23 | 0.160 | 11 |
| x_{13} | 0.216 | 10 | 0.110 | 15 |
| x_{14} | 0.117 | 25 | 0.079 | 24 |
| x_{15} | 0.222 | 9 | 0.110 | 16 |
| x_{16} | 0.170 | 18 | 0.086 | 23 |
| x_{17} | 0.192 | 15 | 0.078 | 25 |
| x_{18} | 0.318 | 4 | 0.210 | 3 |
| x_{19} | 0.207 | 13 | 0.110 | 17 |
| x_{20} | 0.224 | 8 | 0.190 | 5 |
| x_{21} | 0.351 | 3 | 0.200 | 4 |
| x_{22} | 0.293 | 5 | 0.180 | 8 |
| x_{23} | 0.161 | 21 | 0.140 | 12 |
| x_{24} | 0.172 | 17 | 0.098 | 21 |
| x_{25} | 0.494 | 1 | 0.280 | 1 |
| x_{26} | 0.164 | 20 | 0.100 | 19 |
| x_{27} | 0.204 | 14 | 0.180 | 9 |
| x_{28} | 0.280 | 6 | 0.190 | 6 |
| x_{29} | 0.146 | 22 | 0.140 | 13 |
| x_{30} | 0.356 | 2 | 0.220 | 2 |
| x_{31} | 0.180 | 16 | 0.130 | 14 |
| x_{32} | 0.230 | 7 | 0.094 | 22 |
| x_{33} | 0.208 | 12 | 0.110 | 18 |