光伏接人系统的小干扰稳定灵敏度分析及其应用

马燕峰1,景雪1,赵书强1,郑力文1,王子建1,董凌2

(1. 华北电力大学 河北省分布式储能与微网重点实验室,河北 保定 071003;2. 国网青海省电力公司,青海 西宁 810008)

摘要:针对光伏并网对系统小干扰稳定的影响,提出基于随机响应面法和摄动法的阻尼比灵敏度求取方法。 以光伏出力波动的随机激励作为摄动量,通过摄动法求解光伏在不同节点并网的阻尼比灵敏度;根据阻尼比 灵敏度的大小筛选最佳的光伏并网节点,通过优化方法确定光伏发电的接入位置和容量,得到光伏发电的最 佳接入方式。以New England 10机39节点系统和西部某省实际电力系统为例验证所提方法的有效性。 关键词:电力系统;随机响应面法;摄动法;阻尼比灵敏度;小干扰稳定;光伏接入方式 中图分类号:TM 615;TM 712 文献标志码:A DOI:10.16081/j.epae.202104020

0 引言

许多国家将大规模开发新能源发电作为应对气 候变化、改善能源结构的重要选择。然而大规模光 伏接入电网在缓解电力短缺的同时也给电力系统稳 定运行带来了新的挑战。光伏渗透率和接入方式对 电力系统小干扰稳定具有重要影响,因此在考虑负 荷、网损、新能源消纳率等基础上,分析大规模光伏 发电接入方式的不同对系统阻尼比的影响,并在此 基础上研究确定光伏最佳接入地点及容量具有重要 的实际意义。

随机响应面法 SRSM(Stochastic Response Surface Method)是近年来常用于解决输入变量随机性 的方法之一,其通过求解多项式系数,将输入变量和 输出响应相联系。文献[1-2]表明 SRSM 在分析电力 系统不确定性问题时具有准确性高、仿真速度快等 优点。文献[3]利用 SRSM 拟合双馈感应风机出力, 从而预估风电场电-气耦合系统的概率连续混合潮 流方法,并对负荷裕度进行分析。文献[4]以风速作 为输入,以系统特征值、阻尼比、频率作为输出,利用 SRSM 分析系统的小扰动稳定性。文献[5]将 SRSM 与 Nataf 相结合分析含光伏接入电力系统的小干扰 概率稳定性,从而解决输入变量随机性的问题,结果 表明,相较于蒙特卡洛法和点估计法,该方法具有计 算速度快的特点,且具有更高的精确性和效率。

阻尼比灵敏度可以用于分析光伏在不同节点并 网对系统小干扰稳定性的影响。文献[6-7]利用系 统状态矩阵求解特征值灵敏度,从而分析系统参数 对系统灵敏度的影响,但在实际运用中该方法求解

收稿日期:2020-07-24;修回日期:2021-02-24

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0902200);国家 电网公司科技项目(5228001700CW)

Project supported by the National Key R&D Program of China (2017YFB0902200) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (5228001700CW)

过程复杂,维数高,耗时长。文献[8]利用特征值灵 敏度调节控制参数,从而改善电网阻尼比和稳定裕 度。文献[9]利用系统特征值灵敏度求解阻尼比灵 敏度,但该方法对于大规模系统存在求取困难等问 题。文献[10]利用广域测量的方法求解阻尼比灵敏 度,解决了利用状态矩阵求解时求解过程复杂等问 题,但对系统模型的精确度要求较高。文献[11]提 出基于摄动法求解阻尼比-有功灵敏度,该方法计算 过程简单,耗时短。同时,在相同的光伏渗透率下, 系统中不同的光伏接入位置和容量、机组不同的功 率分配方式也会对系统的阻尼产生不同影响^[12]。电 力系统的安全运行受到系统潜在的弱阻尼振荡模式 的巨大影响^[13],为了提高大规模光伏并网系统的小 干扰稳定性,需要考虑光伏发电不同功率分配方式 对系统弱阻尼振荡模式阻尼比的影响。

基于以上分析,本文在 SRSM 的基础上,以光伏 出力的随机激励为摄动值,利用摄动法求解关于光 伏的阻尼比灵敏度,考虑到不同光伏并网点和并网 容量对小干扰稳定的影响,利用阻尼比灵敏度指导 光伏并网的接入方式。

1 光伏接入系统的阻尼比灵敏度求取

1.1 基于SRSM的含光伏电力系统小干扰稳定分析

SRSM直接建立输入变量与输出响应之间的函数关系,可大规模降低仿真次数并保证输出响应的精度^[2]。本文将光照强度作为SRSM的输入变量、阻尼比作为SRSM的输出变量进行分析计算。

1.1.1 光伏电站光照建模

光照强度在短时间尺度(几小时至一天)与长时间尺度内均服从Beta分布^[5],其概率密度函数为:

$$f(r) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{r}{r_{\max}}\right)^{\alpha - 1} \left(1 - \frac{r}{r_{\max}}\right)^{\beta - 1}$$
(1)

其中,r为实际的光照强度; r_{max} 为研究时间内的最大 光照强度; α 和 β 为 Beta 分布的形状参数; $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma函数。

光伏发电总的有功功率P可以表示为:

$$P = rA\eta \tag{2}$$

其中,A为光伏电池总面积;η为光伏电站总转换 效率。

1.1.2 SRSM

SRSM 建立输入变量与输出响应之间函数关系的前提是输入及输出变量均为标准正态随机变量,因此需实现光照强度原始空间与标准正态空间的相互转化。由概率变换原则可知,随机变量 *x* 与标准正态变量 *y* 有如下关系:

$$\begin{cases} \Phi(y) = F_{X}(x) \\ y = \Phi^{-1}(F_{X}(x)) \end{cases}$$
(3)

其中, $F_x(\cdot)$ 为相关非正态变量的边缘概率密度函数; $\Phi(\cdot)$ 为服从标准正态分布的随机变量的累积概率分布函数; $\Phi^{-1}(\cdot)$ 为 $\Phi(\cdot)$ 的反函数。

在 SRSM 中输出响应一般用 Hermite 多项式展 开。设输出响应的估计值为 \hat{y} ,标准正态随机变量向 量为 $\boldsymbol{\xi} = (\boldsymbol{\xi}_1, \boldsymbol{\xi}_2, \dots, \boldsymbol{\xi}_N)^{\mathrm{T}}$ 。其中, $\boldsymbol{\xi}_i$ 为标准正态随机 变量;N为输入响应数量。则有:

$$\hat{y} = a_0 + \sum_{i_1=1}^{N} a_{i_1} \Gamma_1(\xi_{i_1}) + \sum_{i_1=1}^{N} \sum_{i_2=1}^{i_1} a_{i_1 i_2} \Gamma_2(\xi_{i_1}, \xi_{i_2}) + \sum_{i_1=1}^{N} \sum_{i_2=1}^{i_1} \sum_{i_2=1}^{i_2} a_{i_1 i_2 i_3} \Gamma_3(\xi_{i_1}, \xi_{i_2}, \xi_{i_3}) + \cdots$$
(4)

其中, a_0 为Hermite多项式首项; $a_{i_1i_2\cdots i_p}(p=1,2,\cdots)$ 为 需求解的待定系数,为常数项; $\Gamma_p(\xi_{i_1},\xi_{i_2},\cdots,\xi_{i_p})$ 为p阶Hermite多项式。

采用基于线性无关原则的概率配点选取法选取 光伏电站光照的配点组,并生成系数矩阵。将服从 独立标准正态分布的配点组转化为非正态的值,将 配点组映射到原始随机变量中,再将这些值当作确 定值代替原来的随机值,根据实际情况进行仿真得 到输出响应向量 Y。在得到输出响应向量 Y和对应 的标准正态随机变量 H后,将其代入式(5)得到待定 系数 a。

$$Y = Ha \tag{5}$$

其中, $Y = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T$ 为实际测量得到的 SRSM 输出响应矩阵, y_1, y_2, \dots, y_N 为根据实际情况所得输 出响应; $a = [a_1, a_2, \dots, a_N]^T$ 为系数矩阵, a_1, a_2, \dots, a_N 为Hermite 多项式的待定系数。

求出 Hermite 多项式的待定系数后,将其代入 SRSM模型中,形成关于输出响应估计值与对应的标 准正态随机变量 H的多项式,并通过大量抽样生成 标准正态随机变量 H的样本值,最后计算输出响应 即机电模式阻尼比期望。

1.2 基于摄动法与SRSM的阻尼比灵敏度求取

在新能源的随机激励下其有功输出会产生微小 波动^[11],因此将光伏出力波动随机性带来的随机扰 动作为摄动量,光伏接入后代替系统部分机组出力, 同时由于光伏出力波动会导致系统振荡模式阻尼比 产生变化,以两者的变化量为基础,利用摄动法求解 光伏并网节点的阻尼比灵敏度。

输出变化量和阻尼比灵敏度的关系为:

$$\Delta PS = \Delta \zeta \tag{6}$$

其中, $\Delta P \in \mathbb{R}^{n \times i}$ 为时间窗滑动n+1次产生的n个相同 滑动间隔所对应的i个节点处光伏有功输出变化量 矩阵; $S \in \mathbb{R}^{i \times 1}$ 为i个节点处光伏并网后对关键模式 阻尼比的灵敏度矩阵; $\Delta \zeta \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ 为n个间隔下关键 振荡模式阻尼比变化量矩阵。

假设第m个数据窗与第m+1个数据窗对应的*i* 个节点处光伏有功输出和阻尼比分别为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{P}^{(m+1)} = [P_1^{(m+1)}, P_2^{(m+1)}, \cdots, P_i^{(m+1)}] \\ \boldsymbol{\zeta}^{(m+1)} = \boldsymbol{\zeta}_1^{(m+1)} = \boldsymbol{\zeta}_2^{(m+1)} = \cdots = \boldsymbol{\zeta}_i^{(m+1)} \end{cases}$$
(8)

其中, $P^{(m)}$ 为第*m*个数据窗对应的*i*个节点处光伏有 功输出向量; $\zeta^{(m)}$ 为第*m*个数据窗对应的阻尼比; $P_1^{(m)}$ 、 $P_2^{(m)}$ 、…、 $P_i^{(m)} = \zeta_1^{(m)}$ 、 $\zeta_2^{(m)}$ 、…、 $\zeta_i^{(m)}$ 分别为第*m*个数 据窗对应的*i*个节点处光伏有功输出和阻尼比。

第*m*个间隔所对应的变化量为:

$$\begin{cases} \Delta \boldsymbol{P}^{(m)} = [P_1^{(m+1)} - P_1^{(m)}, P_2^{(m+1)} - P_2^{(m)}, \cdots, P_i^{(m+1)} - P_i^{(m)}] = \\ [\Delta \boldsymbol{P}_1^{(m)}, \Delta \boldsymbol{P}_2^{(m)}, \cdots, \Delta \boldsymbol{P}_i^{(m)}] \\ \Delta \boldsymbol{\zeta}^{(m)} = \boldsymbol{\zeta}_1^{(m+1)} - \boldsymbol{\zeta}_1^{(m)} = \boldsymbol{\zeta}_2^{(m+1)} - \boldsymbol{\zeta}_2^{(m)} = \cdots = \boldsymbol{\zeta}_i^{(m+1)} - \boldsymbol{\zeta}_i^{(m)} \end{cases}$$
(9)

由此,摄动法求解的阻尼比灵敏度方程为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^{(1)} & \Delta P_2^{(1)} & \cdots & \Delta P_i^{(1)} \\ \Delta P_1^{(2)} & \Delta P_2^{(2)} & \cdots & \Delta P_i^{(2)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \Delta P_1^{(n)} & \Delta P_2^{(n)} & \cdots & \Delta P_i^{(n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \zeta^{(1)} \\ \Delta \zeta^{(2)} \\ \vdots \\ \Delta \zeta^{(n)} \end{bmatrix}$$
(10)

其中,*S_j*(*j*=1,2,…,*i*)为节点*j*处光伏并网后对关键 模式阻尼比的灵敏度。

在零误差的情况下,可采用式(10)直接进行计算,但是由于摄动法所用参数均来源于随机激励下的响应数据,因此在测量及计算过程中难免存在误差,本文采用平均近似计算法^[11],即:

$$\begin{cases} S_1^{(m)} \Delta P_1^{(m)} + S_2^{(m)} \Delta P_2^{(m)} + \dots + S_i^{(m)} \Delta P_i^{(m)} = \Delta \zeta^{(m)} \\ S_j^{(m)} = \Delta \zeta^{(m)} / \Delta P_j^{(m)} \quad j = 1, 2, \dots, i \end{cases}$$
(11)

其中,*S*^(m)为第*m*个数据窗对应的节点*j*处阻尼比的灵敏度。

:

$$S' = \begin{bmatrix} \Delta S_1^{(1)} & \Delta S_1^{(2)} & \cdots & \Delta S_1^{(n)} \\ \Delta S_2^{(1)} & \Delta S_2^{(2)} & \cdots & \Delta S_2^{(n)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \Delta S_i^{(1)} & \Delta S_i^{(2)} & \cdots & \Delta S_i^{(n)} \end{bmatrix}$$
(12)

其中, $\Delta S_{i}^{(m)} = S_{i}^{(m+1)} - S_{i}^{(m)} (j=1,2,\cdots,i;m=1,2,\cdots,n)_{\circ}$

72

每个节点对应n个灵敏度系数,对S'中每一行的数值进行筛选并求取平均值,即可得到与光伏并网节点相对应的灵敏度阵列S,对其进行排序并利用该序列决定光伏并网节点,从而提高小干扰稳定性。

本文首先将波动的光伏出力作为输入变量,利用 SRSM 求解该运行状态下的系统振荡模式阻尼比,再将光伏出力波动产生的随机扰动以及通过 SRSM 得到的阻尼比代入摄动法得到阻尼比灵敏度。利用 SRSM 与摄动法的精度高、速度快等优点,可大幅缩短系统阻尼比灵敏度的计算时间。

结合SRSM与摄动法来求解阻尼比灵敏度的计算流程如图1所示。





Fig.1 Flowchart of damping ratio sensitivity calculation

2 基于阻尼比灵敏度的光伏接入方式

目前,光伏接入主网的方式主要为集中式接入, 但是接入点和接入容量会影响消纳和系统稳定运 行。为了保证大规模光伏接入电力系统的小干扰稳 定性,本文在考虑负荷、经济性和消纳率等因素给出 备选装机位置的基础上,利用阻尼比灵敏度确定光 伏发电的最佳接入方式,进一步从小干扰稳定性角 度给出接入方式建议。

基于阻尼比灵敏度的光伏接入方式流程见图2。



图2 光伏接入方式确定流程

Fig.2 Flowchart of determining photovoltaic access mode 在应用阻尼比灵敏度确定光伏接入方式时,应注意 如下问题:

1)由于摄动法利用光伏产生的微小波动进行计 算,为保证阻尼比灵敏度的有效性,大容量光伏接入 系统时应采用分步计算,同时在分步计算时应选取 合适的光伏接入步长,从而将光伏分n次接入系统 中,且步长不应过大以保证分析计算的准确性;

2)若系统存在弱阻尼振荡模式,则基于SRSM 和摄动法求解光伏并网节点对弱阻尼振荡模式的阻 尼比灵敏度,将光伏接入阻尼比灵敏度最大的节点 以提高系统小干扰稳定性;

3)运行方式变化会引起阻尼比灵敏度变化,因 此在每步光伏接入后需重新计算系统阻尼比及关键 振荡模式阻尼比灵敏度,以保证光伏接入后不会产 生新的弱阻尼振荡模式,保证系统小干扰稳定性;

4)若光伏接入系统后系统产生新的弱阻尼振荡 模式,则说明该光伏接入位置不正确,应接入阻尼比 灵敏度稍小的节点,依此循环,直至增加光伏出力后 的弱阻尼振荡模式阻尼比不小于原系统弱阻尼振荡 模式阻尼比;

5)循环n次将光伏全部接入系统,得到光伏最 佳接入方式。

3 仿真分析

3.1 New England 10机 39节点系统

3.1.1 算例介绍

为了验证基于 SRSM 与摄动法求解阻尼比灵敏 度,并根据该灵敏度确定光伏接入节点的有效性,利 用 New England 10机 39节点系统对所提方法进行 验证,系统图见附录 A 图 A1。该系统共有 39 个节 点、10台发电机、12台变压器、34条线路,其中节点 3、20、23、24、26、30、31、33、35、39 为综合考虑负荷、 经济性和消纳率等条件满足建设需求的光伏接入备 选节点。不失一般性,上述节点包含负荷节点、发电 机节点和联络节点。

利用电力系统工具箱 PST(Power System Toolbox)分析计算该系统小干扰稳定的机电振荡模式, 其振荡参数如表1所示。

表1 机电振荡模式振荡参数

Table 1 Oscillation parameters of electromechanical

| oscillation mode | | | | |
|------------------|---------------------|--------|---------|--|
| 模式 | 特征值 | 阻尼比/% | 频率 / Hz | |
| 1 | -0.24±j3.370 | 7.1489 | 0.54 | |
| 2 | $-0.23 \pm j5.264$ | 4.4354 | 0.84 | |
| 3 | $-0.28 \pm j 5.930$ | 4.7115 | 0.94 | |
| 4 | -0.31 ± j6.540 | 4.6977 | 1.04 | |
| 5 | $-0.29 \pm j7.280$ | 3.9672 | 1.16 | |
| 6 | $-0.33 \pm j8.130$ | 4.1125 | 1.29 | |
| 7 | $-0.50 \pm j 8.390$ | 5.9514 | 1.34 | |
| 8 | $-0.40 \pm j 8.630$ | 4.5812 | 1.37 | |
| 9 | -0.68±j8.620 | 7.8140 | 1.38 | |

3.1.2 基于摄动法的阻尼比灵敏度方法验证

由表1数据可知,振荡频率为1.16 Hz的模式5 的阻尼比仅为3.9672%,需采取措施提高阻尼比。

利用本文方法计算该系统各备选接入点弱阻尼 振荡模式的阻尼比灵敏度,滑动200次的计算结果 如表2所示。

分析表2数据可知,节点3的阻尼比灵敏度均值 最大,因此将光伏接入节点3时系统小干扰稳定性 最好。将10 MW光伏分别接入上述节点后得到弱 阻尼振荡模式5的阻尼比均值如表3所示,将光伏接 入节点3时系统阻尼比均值提高为3.9739%,系统 小干扰稳定性最强,与阻尼比灵敏度计算结果一致, 该结果验证了将摄动法与SRSM相结合来求解阻尼 比灵敏度的有效性。

3.1.3 运行方式对系统阻尼比灵敏度的影响

在已知将摄动法与SRSM相结合来求解阻尼比

表2 模式5对各节点的阻尼比灵敏度均值

Table 2 Mean damping ratio sensitivity of

Mode 5 to each node

| 节点 | 节点性质 | 阻尼比灵敏度均值 |
|----|----------|-------------------------|
| 3 | 负荷节点 | 6.640×10 ⁻⁶ |
| 20 | 负荷节点 | -3.450×10 ⁻⁶ |
| 23 | 负荷节点 | -2.620×10 ⁻⁶ |
| 24 | 负荷节点 | -9.840×10 ⁻⁶ |
| 26 | 负荷节点 | 4.610×10 ⁻⁶ |
| 30 | 发电机节点 | -3.870×10 ⁻⁶ |
| 31 | 发电机节点 | -2.000×10 ⁻⁸ |
| 33 | 发电机节点 | -1.107×10 ⁻⁵ |
| 35 | 发电机节点 | 5.140×10 ⁻⁶ |
| 39 | 负荷及发电机节点 | 7.600×10 ⁻⁷ |

表3 光伏分别接入各节点后得到的模式5阻尼比均值

 Table 3
 Mean damping ratios of Mode 5 obtained

| after | photovoltaic | respectivel | y accesse | d to | each | node |
|-------|--------------|-------------|-----------|------|------|-------|
| 节占 | 1 阳尼比地 | 勾值 / % | 节占 | 阻斥 | 北均位 | 直 / % |

| 見見 | 阻尼比均阻 / % | 同時 | 阻尼比均值/% |
|----|-----------|----|---------|
| 3 | 3.9739 | 30 | 3.9599 |
| 20 | 3.9665 | 31 | 3.9671 |
| 23 | 3.9668 | 33 | 3.9562 |
| 24 | 3.9578 | 35 | 3.9734 |
| 26 | 3.9724 | 39 | 3.9679 |

灵敏度有效性的前提下,分析系统不同运行方式对 系统阻尼比灵敏度的影响,验证在确定光伏接入方 式时多次计算系统不同运行方式下的弱阻尼振荡模 式阻尼比灵敏度的必要性。

1)运行方式1。系统中各负荷都增至原负荷的 1.01倍,并增加光伏装机容量,使增加的负荷由光伏 承担。此时系统中关键振荡模式的模式5关于光伏 的阻尼比灵敏度均值如表4所示。由表可知,节点3 的阻尼比灵敏度均值最大。

表4 不同运行方式下模式5的阻尼比灵敏度均值

Table 4 Mean damping ratio sensitivity of

| whole 5 under different operating mode | Mode | 5 | under | different | operating | mode |
|--|------|---|-------|-----------|-----------|------|
|--|------|---|-------|-----------|-----------|------|

| - 世 上 | 阻尼比灵 | 敏度均值 |
|-------|-------------------------|-------------------------|
| 从미 | 运行方式1 | 运行方式2 |
| 3 | 9.520×10 ⁻⁶ | 2.950×10 ⁻⁶ |
| 20 | -3.040×10 ⁻⁶ | 5.960×10 ⁻⁶ |
| 23 | 5.810×10 ⁻⁶ | 1.140×10 ⁻⁶ |
| 24 | 9.900×10 ⁻⁷ | 4.650×10 ⁻⁶ |
| 26 | -1.083×10 ⁻⁵ | 2.690×10 ⁻⁶ |
| 30 | 3.670×10 ⁻⁶ | -6.050×10 ⁻⁶ |
| 31 | -2.800×10 ⁻⁷ | 1.320×10 ⁻⁶ |
| 33 | 1.590×10 ⁻⁶ | -1.150×10 ⁻⁶ |
| 35 | -3.150×10 ⁻⁶ | -7.190×10 ⁻⁶ |
| 39 | -3.400×10 ⁻⁷ | 5.070×10 ⁻⁶ |
| | | |

2)运行方式2。仅增大节点4和15的负荷,使 系统总负荷增至原系统的1.01倍,仍由光伏承担系 统增加的负荷,此时模式5仍为弱阻尼振荡模式,该 模式关于光伏的阻尼比灵敏度均值如表4所示。由 表可知,所有节点关于光伏的阻尼比灵敏度均值均 有改变,节点20的阻尼比灵敏度均值最大,为此时 的光伏最佳并网节点。

上述结果说明系统运行方式不同,系统的阻尼 比灵敏度也不同,在选择光伏接入方式时应考虑光 伏接入节点、光伏装机容量及负荷布局,从而得到光 伏最佳接入方式,验证了每次光伏接入后系统关键 振荡模式及其阻尼比灵敏度重新计算的必要性。 3.1.4 基于阻尼比灵敏度的光伏接入方式验证

为了验证本文提出的基于阻尼比灵敏度的光 伏接入方式的优越性,采用3种不同接入方案将 200 MW光伏接入系统中,并利用系统的弱阻尼振荡 模式阻尼比均值对比光伏不同接入方式对系统小干 扰稳定的影响。

1)方案1。将光伏增装容量均分为4个部分,分 别接入表2中阻尼比灵敏度均值为正值的4个节点, 即在节点3、26、35、39各增装50 MW光伏。

2)方案2。利用遗传算法求解系统光伏最佳接 入方式。系统变量为各节点光伏装机容量,接入容 量上限为50 MW,下限为0,目标函数为系统弱阻尼 振荡模式阻尼比最大。

3)方案3。采用本文方法将增装容量分20次接 入系统,计算每次装机容量改变后的系统阻尼比灵 敏度,并将每次增装的10 MW光伏接入此时阻尼比 灵敏度最大的节点。

采用3种不同接入方案将光伏接入电力系统时 系统的弱阻尼振荡模式阻尼比均值见表5,方案2 和方案3下各节点的光伏装机容量见附录A表A1。

表5 不同接入方案下系统弱阻尼振荡模式阻尼比均值

Table 5 Mean damping ratio of system weak damping oscillation mode under different access schemes

| 方案 | 弱阻尼振荡模式 | 阻尼比均值 / % |
|----|---------|-----------|
| 1 | 5 | 4.1134 |
| 2 | 5 | 4.1572 |
| 3 | 5 | 4.1616 |

由表5可知,相较于方案1与方案2,方案3的弱 阻尼振荡模式阻尼比均值最高,这主要是因为方案 3在每次迭代时均利用阻尼比灵敏度选取最佳接入 节点,从而提高光伏接入系统的小干扰稳定性。

上述分析验证了本文提出的基于阻尼比灵敏度的光伏接入方式的可靠性,提高了系统小干扰稳定性。

3.2 西部某省电力系统

以西部某省2017年电力系统为例进行分析。 系统图见附录A图A2,参数见文献[14],其中光伏 容量为7740 MW。系统中节点1、4、5、10、18、25、29 为满足建设需求的光伏接入备选节点。系统中没有 光伏接入时的振荡参数见附录A表A2。利用本文 光伏接入方式将7740 MW光伏接入该系统备选节 点,计算结果见附录A表A3,光伏接入前、后的振荡 模式阻尼比均值如表6所示。

表6 光伏接入前、后阻尼比均值

Table 6 Average value of damping ratio before and after photovoltaic accessed

| anu | aner | photovonaic | accessed |
|-----|------|-------------|----------|
| | | | |

| 樹士 | 阻尼比均 | 匀值 / % |
|----|---------|---------|
| 厌式 | 接入前 | 接入后 |
| 1 | 13.4357 | 13.4265 |
| 2 | 10.0194 | 10.0194 |
| 3 | 4.3230 | 5.743 1 |
| 4 | 2.9697 | 4.1073 |
| 5 | 2.8949 | 4.0158 |
| 6 | 4.5861 | 5.4569 |
| 7 | 3.8062 | 4.3458 |
| 8 | 3.5629 | 4.5718 |
| 9 | 16.3013 | 16.3004 |
| 10 | 3.4891 | 4.7834 |
| 11 | 3.2533 | 4.0026 |
| 12 | 4.5161 | 6.0147 |
| 13 | 9.5654 | 9.8247 |

由表6可知,光伏接入前的系统弱阻尼振荡模 式为模式5,阻尼比均值为2.8949%,光伏接入后的 系统弱阻尼振荡模式变为模式11,阻尼比均值为 4.0026%,系统弱阻尼振荡模式阻尼比大幅提高。

通过上述分析可知,当大规模光伏接入电力系统时,其接入方式对系统小干扰稳定性的影响较大, 本文所提出的接入方式可提高系统弱阻尼振荡模式 阻尼比,增强系统稳定性。

4 结论

本文基于系统小干扰稳定性对光伏最佳接入方 式问题进行研究,提出光伏接入系统的阻尼比灵敏度 求解方法,并以其指导光伏接入方式,得到结论如下。

1)结合 SRSM 和摄动法求解得到的光伏并网节 点的阻尼比灵敏度能够准确反映系统阻尼比与光伏 并网节点之间的关系。

2)可分多阶段将大规模光伏接入电力系统并利 用阻尼比灵敏度作为指导。综合考虑不同运行方式下 的弱阻尼振荡模式阻尼比及其他模式阻尼比变化量 确定光伏接入方式,更有利于增强系统小干扰稳定性。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1] 韩冬,马进,贺仁睦,等. 基于随机响应面法的电力系统仿真不确定性分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(24):12-16,52.
 HAN Dong, MA Jin, HE Renmu, et al. Uncertainty analysis based on stochastic response surface method in power system simulation[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35 (24):12-16,52.
- [2] 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):56-62,18.

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):56-62,18. [3] 马瑞,秦佳倩.含DFIG风电场电-气耦合系统的概率连续混 合潮流方法及其负荷裕度分析[J].电力自动化设备,2019,39 (8):38-46.

MA Rui, QIN Jiaqian. Probabilistic continuous hybrid flow method for electricity-gas coupling system integrated with DFIG wind farm and its load margin analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8); 38-46.

- [4] 马燕峰,刘佳,闫纪源.基于随机响应面法的含风电电力系统 小扰动稳定性分析[J].电工技术学报,2017,32(6):49-57.
 MA Yanfeng,LIU Jia,YAN Jiyuan. Small disturbance stability analysis of power system containing wind power based on stochastic response surface method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2017,32(6):49-57.
- [5]周一辰.含大规模集中式光伏汇纳的电力系统小干扰稳定分析与控制研究[D].北京:华北电力大学,2018.
 ZHOU Yichen. Small signal stability analysis and control for power systems with large-scale concentrated solar photovoltaic plant[D]. Beijing:North China Electric Power University,2018.
- [6] 马进,徐昊,张国飞,等.基于特征值灵敏度的负荷模型对系统 阻尼影响的分析方法[J].电网技术,2011,35(7):87-90.
 MA Jin,XU Hao,ZHANG Guofei, et al. An eigenvalue sensitivity-based method to analyze effects of load model on system damping[J]. Power System Technology,2011,35(7):87-90.
- [7] 廖清芬,刘涤尘,党杰,等. 励磁系统模型和参数对低频振荡特 征值的灵敏度分析[J]. 电力自动化设备,2009,29(3):69-73.
 LIAO Qingfen,LIU Dichen,DANG Jie,et al. Sensitivity analysis of low frequency oscillation eigenvalue to excitation system model and parameter[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(3):69-73.
- [8] 马燕峰,杜江龙,赵书强.交直流电力系统区域振荡混合控制 策略[J].电力自动化设备,2014,34(8):52-57.
 MA Yanfeng, DU Jianglong, ZHAO Shuqiang. Hybrid areal oscillation control strategy of AC-DC power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(8):52-57.
- [9] 李生虎,蒋以天,于新钰,等.考虑DFIG 桨距角参数优化的小 干扰稳定约束最优潮流模型[J].电力自动化设备,2019,39 (11):20-26.

LI Shenghu, JIANG Yitian, YU Xinyu, et al. Small-signal stability constrained optimal power flow model considering optimization of DFIG pitch angle[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 20-26.

- [10] MENDOZA-ARMENTA S, DOBSON I. Applying a formula for generator redispatch to damp interarea oscillations using synchrophasors[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31 (4):3119-3128.
- [11] 杨德友,王文嘉,高际惟,等.随机数据驱动下的机电振荡参数 在线提取与阻尼调制(二):基于有功调节的区间模式阻尼调制 策略[J]. 中国电机工程学报,2018,38(9):2571-2579,2825.
 YANG Deyou,WANG Wenjia,GAO Jiwei,et al. On line electromechanical oscillation analysis and damping modulation for power system using ambient data(part II):inter area modes damping regulating based on generators redispatching[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(9):2571-2579,2825.
- [12] 王铭.风光储接入对电力系统稳定性的影响分析[D].太原: 太原理工大学,2016.
 WANG Ming. Stability analysis of power system integrated with wind farm, energy storage system and photovoltaic system
 [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [13] 鄂彦君.基于自动频域分解法的小干扰稳定分析方法研究
 [D].吉林:东北电力大学,2019.
 E Yanjun. Small signal stability analysis method research

based on automated frequency domain decomposition [D]. Jilin:Northeast Electric Power University, 2019.

[14] 赵书强,索璕,马燕峰.高比例可再生能源的多点容量规划方法[J].电力自动化设备,2020,40(5):8-18.
 ZHAO Shuqiang,SUO Xun,MA Yanfeng. Multi-point capacity planning method for high proportion of renewable energy[J].
 Electric Power Automation Equipment,2020,40(5):8-18.

作者简介:



马燕峰(1978—),女,河北唐山人,副 教授,博士,研究方向为电力系统分析、运行 与控制(E-mail:ma_yanfeng01@163.com);

景 雪(1996—),女,青海海东人,硕士 研究生,主要研究方向为电力系统分析、运 行与控制(E-mail:18097385552@163.com); 赵书强(1964—),男,河北衡水人,教

授,博士,主要研究方向为电力系统稳定性

马燕峰

分析与控制、电力系统规划与可靠性等。 (编辑 王锦秀)

Analysis and application of small disturbance stability sensitivity of photovoltaic accessed system

MA Yanfeng¹, JING Xue¹, ZHAO Shuqiang¹, ZHENG Liwen¹, WANG Zijian¹, DONG Ling²

 Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid of Hebei Province, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810008, China)

Abstract: Aiming at the impact of photovoltaic integration on system small disturbance stability, a solving method of damping ratio sensitivity based on random response surface method and perturbation method is proposed. The random excitation of photovoltaic output fluctuation is taken as the perturbation, and the damping ratio sensitivities are solved with photovoltaic accessed to grid on different nodes by the perturbation method. The optimum photovoltaic accessed node is selected according to the damping ratio sensitivity, the access location and capacity of photovoltaic power generation are determined through optimization method, and the optimum access mode of photovoltaic power generation is obtained. New England 10-generator 39-bus system and an actual power system in a western province are taken for examples, which verifies the effectiveness of the proposed method.

Key words: electric power systems; stochastic response surface method; perturbation method; damping ratio sensitivity; small disturbance stability; photovoltaic access mode

附录 A:



图 A1 New England 10 机 39 节点系统图 Fig.A1 Schematic diagram of New England 10-generator 39-bus system

| Table A1 PV installed capacity of each node | | | | | |
|---|----------|-------|-------|--|--|
| # F | 廿上卅氏 | 光伏装机等 | 容量/MW | | |
| 口口 | 卫点性质 | 方案 2 | 方案3 | | |
| 3 | 负荷节点 | 18.75 | 20 | | |
| 20 | 负荷节点 | 3.15 | 0 | | |
| 23 | 负荷节点 | 36.64 | 40 | | |
| 24 | 负荷节点 | 42.89 | 50 | | |
| 26 | 负荷节点 | 4.53 | 10 | | |
| 30 | 发电机节点 | 11.21 | 0 | | |
| 31 | 发电机节点 | 17.09 | 20 | | |
| 33 | 发电机节点 | 16.32 | 20 | | |
| 35 | 发电机节点 | 33.27 | 30 | | |
| 39 | 负荷及发电机节点 | 16.15 | 10 | | |

表 A1 各节点的光伏装机容量



图 A2 西部某省电力系统

Fig.A2 Power system in a western province

表 A2 西部某省电力系统机电模式振荡参数

|--|

| 模式 | 特征值 | 阻尼比/% | 频率/Hz |
|----|--|----------|-----------|
| 1 | -0.359 300 ± j2.174 635 | 13.435 7 | 0.350 796 |
| 2 | -0.379 841 ± j2.801 460 | 10.019 4 | 0.449 946 |
| 3 | -0.361 585 ± j3.590 687 | 4.323 0 | 0.574 366 |
| 4 | -0.430 014 \pm j4.474 903 | 2.969 7 | 0.715 484 |
| 5 | -0.250 012 \pm j5.445 775 | 2.894 9 | 0.867 635 |
| 6 | -0.255 003 \pm j5.893 277 | 4.586 1 | 0.938 822 |
| 7 | -0.290 481 ± j6.425 507 | 3.806 2 | 1.023 696 |
| 8 | $-0.250\ 001 \pm \mathrm{j}6.563\ 449$ | 3.562 9 | 1.045 363 |
| 9 | -0.250 006 ± j7.012 566 | 16.301 3 | 1.116 794 |
| 10 | -0.251 677 ± j7.208 825 | 3.489 1 | 1.148 019 |
| 11 | -0.250 028-j7.681 264 | 3.253 3 | 1.223 159 |
| 12 | -0.250 000 ± 8.414 542 | 4.516 1 | 1.339 807 |
| 13 | $-0.250\ 000 \pm j8.632\ 338$ | 9.565 4 | 1.374 455 |

表 A3 各节点的光伏装机容量

Table A3 PV installed capacity of each node

| 节点 | 光伏装机容量/MW | 节点 | 光伏装机容量/MW |
|----|-----------|----|-----------|
| 1 | 2 650 | 18 | 870 |
| 4 | 1 880 | 25 | 30 |
| 5 | 910 | 29 | 110 |
| 10 | 1 290 | | |