



高比例风电接入下次同步振荡监测系统次同步相量监测装置多阶段优化配置方法

易善军 项颂 苏鹏 王杨 宋子宏

A Multi-stage Optimal Configuration Method for SPMU of Subsynchronous Oscillation Monitoring System Under High Proportion of Wind Power

YI Shanjun, XIANG Song, SU Peng, WANG Yang, SONG Zihong

引用本文:

易善军, 项颂, 苏鹏, 等. 高比例风电接入下次同步振荡监测系统次同步相量监测装置多阶段优化配置方法[J]. 现代电力, 2023, 40(1): 18–26. DOI: 10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0239

YI Shanjun, XIANG Song, SU Peng, et al. A Multi-stage Optimal Configuration Method for SPMU of Subsynchronous Oscillation Monitoring System Under High Proportion of Wind Power[J]. *Modern Electric Power*, 2023, 40(1): 18–26. DOI: 10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0239

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0239>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

风电并网系统次/超同步振荡的动态监测方法研究

Research on Dynamic Monitoring Method for Sub/Super-synchronous Oscillation in Wind Power Systems

现代电力. 2019, 36(3): 19–26 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I3/19>

双馈风电场串补送出系统次同步振荡及参数调整分析

Subsynchronous Oscillation Analysis and Parameter Adjustment of Doubly-fed Wind Farm System via Series Compensation

现代电力. 2020, 37(3): 238–244 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2019.0362>

直驱风机对火电机组次同步振荡的影响及抑制方法

Impact of PMSG to Thermal Power Units on Sub-synchronous Oscillation Characteristics and Suppression Strategy

现代电力. 2019, 36(5): 31–38 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I5/31>

含并联直驱风电机组并网的风电场多开环模式谐振

Multi Open-Loop Mode Resonance of Wind Farm with Grid-Connected Parallel Permanent Magnet Synchronous Generators

现代电力. 2022, 39(1): 19–25 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0018>

多区域综合能源系统的两阶段容量优化配置方法

A Two-stage Optimal Capacity Configuration of Multi-region Integrated Energy System

现代电力. 2020, 37(5): 441–447 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2019.1077>

含风电的交直流互联电网自适应SPMC调频策略

Adaptive SPMC Frequency Modulation Strategy for AC/DC Interconnected Grid Including Wind Power

现代电力. 2022, 39(4): 414–421 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0152>

高比例风电接入下次同步振荡监测系统次同步相量监测装置多阶段优化配置方法

易善军¹, 项颂¹, 苏鹏¹, 王杨², 宋子宏²

(1. 国网内蒙古东部电力有限公司, 内蒙古自治区呼和浩特市 010010; 2. 四川大学电气工程学院, 四川省成都市 610065)

A Multi-stage Optimal Configuration Method for SPMU of Subsynchronous Oscillation Monitoring System Under High Proportion of Wind Power

YI Shanjun¹, XIANG Song¹, SU Peng¹, WANG Yang², SONG Zihong²

(1. State Grid Inner Mongolia Eastern Power Co., Ltd., Hohhot 010010, Inner Mongolia Autonomous Region, China; 2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China)

摘要: 随着风电等新能源大规模接入, 未来次同步振荡问题将更为突出, 亟需建立新型次同步振荡监测系统。中国学者已针对次同步振荡监测装置——次同步相量监测装置(subsynchronous phasor measurement unit, SPMU)开展了相关研究。在此基础上, 如何经济高效地制定 SPMU 配置方案成为了构建次同步振荡监测系统的首要问题。基于风电机组频率耦合阻抗模型提出计及评价指标之间重要程度差异、振荡工况发生概率的监测关键度评价体系; 考虑到 SPMU 实际安装配置中常存在多阶段安装的情况, 建立计及节点监测关键度的 SPMU 多阶段优化配置模型; 最后利用整数线性规划求解多阶段优化配置方案。采用美国得克萨斯州 ERCOT 系统、改进的 New England 39 节点系统, 验证了所提指标及算法的准确性和经济性。

关键词: 风电; 次同步振荡; 监测系统; 监测关键度; 评价体系; 多阶段优化配置

Abstract: With large-scale grid-connection of such new energy as wind power and so on, the subsynchronous oscillation will be even more prominent in the future, so it is urgently need to establish a new-type of subsynchronous oscillation monitoring system. For this reason, relevant research on the subsynchronous oscillation monitoring device, i.e., the subsynchronous phasor measurement unit (abbr. SPMU), has been conducted by Chinese scholars, and on this basis, how to economically and efficiently enact a configuration plan of SPMU becomes the first question in the construction of subsynchronous

oscillation monitoring system. Based on the frequency-coupled impedance model of wind turbine units, a monitoring critical degree evaluation system, in which the differences among importance of evaluation indices and the probability of occurrence of oscillation under operating condition were taken into account, was proposed. Considering the situation that during the installation and configuration of SPMU there were often the multi-stage installation, a multi-stage optimal configuration model for SPMU, in which the nodal monitoring critical degree was taken into account, was constructed. Finally, the integral linear programming was utilized to solve the multi-stage optimal configuration scheme. Both accuracy and economy of the proposed indices and algorithm are verified by simulation results of ERCOT system in Texas, USA, and the modified New England 39 bus system.

Keywords: wind power; subsynchronous oscillation; monitoring system; monitoring critical index; evaluation system; multi-stage optimal placement configuration

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0239

0 引言

2020 年中国提出的“碳达峰、碳中和”战略发展目标将极大推动以风电为代表的新能源设备发展^[1-2], 未来电力系统将呈现高比例新能源接入的特征。然而, 在发挥节能减排效益的同时, 以风电为代表的新能源发电设备大规模并网所带来的电力系统稳定问题也不容忽视。世界范围内由风电机组与系统间交互作用导致的次同步振荡事故频发^[3-5], 严重影响了电力系统的安全稳定运行,

基金项目: 国家电网公司科技项目(52660021000P)。
Project Supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(52660021000P).

制约了风电等新能源的有效消纳，亟需针对高比例新能源接入电网引起的次同步振荡问题开展振荡监测、抑制等研究。

构建经济、可靠的次同步振荡监测系统是明晰次同步振荡机理及传播路径、开展振荡溯源与抑制研究的必要手段^[6-8]。近年来，诸多学者就如何构建次同步振荡监测系统开展了积极的研究。针对现有广域测量系统的同步相量测量装置 (phasor measurement unit, PMU) 存在的频率遗漏、功率混叠、触发录波等问题，已有学者对现有 PMU 进行改造或研发新型监测装置使之具备分析、记录次同步振荡波形的功能^[9-12]，本文统称为次同步相量监测装置 (subsynchronous phasor measurement unit, SPMU)。文献 [10] 基于快速鲁棒局部回归平滑滤波和宽频分量自适应快速感知与辨识方法，开发了宽频带同步测量终端；文献 [11] 开发了满足宽频电磁振荡多模态特征的监测要求的多模态振荡监测装置；文献 [12] 提出了次同步振荡参数辨识方法，实现了基于 PMU 同步相量数据的次同步振荡参数辨识。在此基础上，如何经济高效地制定 SPMU 配置方案是构建次同步振荡监测系统的首要问题，目前已经对此开展了初步研究。文献 [13] 计及 N-1 故障发生概率和节点关键度首次提出了次同步振荡监测装置优化配置方法。但该方法节点指标计算基于风电机组一阶阻抗模型，未计及机组次、超同步频率耦合效应，且忽略了各评价指标之间重要程度差异。

针对现有问题，本文以高比例风电接入系统为例，研究了 SPMU 的多阶段优化配置问题。相较于全周期优化配置，多阶段优化配置更贴近工程应用中常存在的分级安装的实际情况。本文基于风电机组频率耦合阻抗模型计算了节点监测关键度评价指标，建立了计及指标之间重要程度差异、振荡工况发生概率的监测关键度客观评价体系；考虑到工程中常存在分阶段安装的情况，提出了计及节点监测关键度的 SPMU 多阶段优化配置方法。依托美国得克萨斯州 ERCOT 系统、改进的 New England 39 节点系统，验证了所提指标及算法的准确性和经济性。

1 节点监测关键度

考虑到实际工程应用中存在因风机等新能源机组内部参数获取困难而难以建立精细化阻抗模

型的问题，本节首先利用矢量拟合法对风电机组量测阻抗进行阻抗建模；进一步确定了节点监测关键度评价指标，提出了较为完善的节点监测关键度指标评价体系。

1.1 风机阻抗建模

为实现节点监测关键度指标的计算，可通过注入扰动获得风机等黑盒模型频率耦合响应^[14-15]，步骤如下：确定待测频率；改变扰动幅值，重复注入包含耦合频率的双频扰动信号，获取多组电压电流相量 U 、 I 即可求解待测频率下机组频率耦合阻抗 Z_c ：

$$Z_c = UI^T(I \cdot I^T)^{-1} = \begin{bmatrix} Z_{pp} & Z_{pn} \\ Z_{np} & Z_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中：上标 T 表示取矩阵的转置； Z_c 为二阶矩阵。

频率耦合阻抗模型 Z_c 可表示为 Z_{c1} ^[16]：

$$Z_{c1}(s) \approx \frac{\det(Z_c(s-j\omega))}{Z_{nn}(s-j\omega)} \quad (2)$$

进一步地，本文利用矢量拟合法将离散频率响应 Z_{c1} 拟合为传递函数 $f(s)$ ：

$$f(s) \cong \sum_{k=1}^N \frac{b_k}{s-a_k} + c + sd \quad (3)$$

式中： a_k 、 b_k 分别为 $f(s)$ 的极点、留数； c 、 e 为实系数； N 为传递函数阶数。

矢量拟合法通过设置一组初始极点 $a_{0,k}$ 并构建辅助函数 $\sigma(s)$ ：

$$\sigma(s)f(s) = \sum_{k=1}^N \frac{b_k}{s-a_{0,k}} + c + sd \quad (4)$$

$$\sigma(s) = \sum_{k=1}^N \frac{b_{0,k}}{s-a_{0,k}} + 1 \quad (5)$$

通过最小二乘法求解即可得到 $\sigma(s)$ 的留数。

可将式 (3) 改写为：

$$\left(d \frac{\prod_{k=1}^{N+1} (s-z_k)}{\prod_{k=1}^N (s-a_{0,k})} \right) = \left(\frac{\prod_{k=1}^N (s-z_{0,k})}{\prod_{k=1}^N (s-a_{0,k})} \right) f(s) \quad (6)$$

式中： z_k 和 $z_{0,k}$ 为对应函数零点^[17]。

式 (6) 左右两端极点相消后，右端零点将成为新的极点，重复此过程即可求得 a_k ，进而通过最小二乘法得到 c 、 d ，即可获得风电机组的输出阻抗传递函数表达式。

1.2 节点监测关键度指标

1.2.1 振荡可观性指标

节点的振荡可观性表征了监测装置在该节点所能监测支路振荡电流幅值的相对大小。监测系统中,节点振荡可观性越高,在该点对振荡的监测效果越佳,该点对振荡监测而言更为关键。系统支路、节点振荡可观性如式(7)(8)所示。

$$O_l = \frac{|I_l|}{\sum_{l=1}^{N_L} |I_l|} \quad (7)$$

$$O_n = \frac{\sum_{l \in \Omega_{ln}} O_l}{\sum_{l=1}^{N_L} O_l} \quad (8)$$

式中: O_l 为支路振荡可观性; O_n 为节点振荡可观性; N_L 为支路数量; Ω_{ln} 为节点 n 的邻接支路集合。

若能获取各元件阻抗模型,建立系统回路阻抗矩阵 \mathbf{Z} ,则可建立回路电压与电流之间的关系,进而实现振荡可观性指标的快速计算^[18]。

\mathbf{Z} 的特征值 μ_p 为零或十分接近零时所对应的模态即为振荡模态 $\lambda = \sigma \pm j\omega$, σ 即为振荡阻尼。振荡模态 λ 下,有:

$$\mathbf{Z}^{-1}(\lambda) = \sum_{i=1}^b \mu_i^{-1} \mathbf{H}_{li} \mathbf{W}_{ih} \approx \mu_p^{-1} \mathbf{H}_{lp} \mathbf{W}_{ph} \quad (9)$$

式中: b 为独立回路数; μ_i 为矩阵 \mathbf{Z} 第 i 个特征值; \mathbf{H}_{lp} 和 \mathbf{W}_{ph} 分别为左、右特征矩阵矩阵 \mathbf{H} 和 \mathbf{W} 第 l 行第 p 列、第 p 行第 h 列的元素。

可得支路电流与电压之间的关系为:

$$\mathbf{I}(s) \approx \mu_p^{-1} \mathbf{H}'_{lp} \mathbf{W}'_{ph} \mathbf{V}(s) \quad (10)$$

$$\mathbf{H}' = \mathbf{B}^T \mathbf{H} \quad (11)$$

$$\mathbf{W}' = \mathbf{W} \mathbf{B} \quad (12)$$

式中: \mathbf{H}'_{lp} 和 \mathbf{W}'_{ph} 分别为矩阵 \mathbf{H}' 和 \mathbf{W}' 第 l 行第 p 列、第 p 行第 h 列的元素; \mathbf{B} 为回路-支路关联矩阵; $\mathbf{V}(s)$ 为回路电压向量; $\mathbf{I}(s)$ 为回路电流向量。

代入式(8)可得到振荡模态 λ 下支 l 、节点 n 的振荡可观指标:

$$O_l = \frac{|H'_{lp}|}{\sum_{l=1}^{N_L} |H'_{lp}|} \quad (13)$$

1.2.2 阻尼影响指标

阻尼影响指标反映了风机等潜在振荡源对振荡模态的影响程度,指标越高,调节该扰动源阻抗对系统稳定性调节的效果越明显,对振荡溯源、抑制的意义越高。

定义节点 j 的阻尼影响指标 D_j 为:

$$D_j = \frac{|h_j|}{\sum_{i=1}^{N_B} |h_i|} \quad (14)$$

式中: h_j 为节点 j 所连潜在振荡源阻抗变化 10% 引起的系统阻尼变化量; D_j 为节点 j 的阻尼影响指标; N_B 为系统节点数。

1.3 监测关键度综合评价

在同一振荡工况下,本文采用熵权法评价各节点监测关键度。考虑到系统可能在多个工况下存在次同步振荡风险,而风电机组风速变化、系统发生 $N-1$ 断线故障等影响系统运行工况的因素存在较强的随机性,使得系统不同振荡工况发生概率存在差异。本文通过计及风速、 $N-1$ 断线概率,实现了多工况下的节点监测关键度综合评价。

1.3.1 节点指标赋权

熵权法是一种常用的客观赋权法,不依赖于人的主观判断,评价结果更具数学依据,能够客观评价节点监测关键度各指标。熵权法评价步骤如下:

a) 标准化处理:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (15)$$

式中: x_{ij} 表示第 i 个节点的第 j 个指标。

b) 定义标准化,计算特征比重:

$$Y_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^{N_B} y_{ij}} \quad (16)$$

c) 计算指标信息熵:

$$e_j = -\frac{\sum_{i=1}^{N_B} Y_{ij} \ln Y_{ij}}{\ln N_B} \quad (17)$$

d) 指标赋权:

$$W_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^t (1 - e_j)} \quad (18)$$

式中: t 为指标个数。

1.3.2 节点监测关键度综合评价

目前已有多种概率密度函数描述风速分布模型，如 Rayleigh 分布、Weibull 分布等。鉴于两参数 Weibull 分布更具灵活性^[19]，本文将选取两参数 Weibull 分布描述风速概率分布：

$$P_v = \frac{k}{c} (v/c)^{k-1} \exp[-(v/c)^k] \quad (19)$$

式中： v 为风速； c 、 k 分别为尺度参数、形状参数。

已知风力资源特性（平均风速 v_0 、风速标准差 r ）可通过如下算法计算参数 c 、 k ^[20]：

$$\begin{cases} k = (r/v_0)^{-1.09} \\ c = v_0 k^{2.6674} / (0.184 + 0.816 k^{2.73855}) \end{cases} \quad (20)$$

要计算振荡工况概率，还应确定系统 $N-1$ 断线概率^[21-22]：

$$P_k = (1 - R_L^k) \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{N_L} R_L^i, (k = 1, \dots, N_L) \quad (21)$$

式中： P_k 是线路 k 断线概率； R_L^k 是线路 k 的可靠性； N_L 是系统线路数量。

在获得风速、 $N-1$ 断线概率模型之后，即可计算某一振荡工况发生概率 P ：

$$P = P_k P_v \quad (22)$$

进而可实现多振荡工况下的节点监测关键度 C_i 评价：

$$c_i = (W_1 O_n + W_2 D_n) P \sigma \quad (23)$$

$$C_i = \frac{c_i}{\sum_{i=1}^{N_B} c_i} \quad (24)$$

式中： W_1 为振荡可观性指标的权重； W_2 为阻尼影响程度指标的权重； σ 为该工况阻尼大小。

2 SPMU 多阶段优化配置模型

本文认为在全周期安装规划中，应优先保证 SPMU 最终安装在监测关键度更高的节点上；在各子阶段进行安装规划时，应保证本阶段的安装方案能够使监测系统可观测程度最佳的同时使 SPMU 配置在更为关键的节点上。因此，对含有 N_B 个节点、 N_L 条线路的系统，本文首先以节点监测关键度指标为节点权重，全局可观为约束条件，建立 SPMU 全周期配置模型，并求解全周期配置方案 Q^K 。进一步地，基于全周期配置方案，在

各阶段内以系统可观测程度最大为目标、SPMU 预期安装数量为约束建立 SPMU 子阶段优化配置模型。

2.1 全周期优化配置模型

SPMU 全周期优化配置模型如式 (25) 所示：

$$\begin{cases} \min \left(\sum_{i=1}^{N_B} x_i - \sum_{i=1}^{N_B} C_i x_i \right) \\ \text{s.t. } \sum_{j \in \Omega_i} x_j \geq 1 \\ x_i \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (25)$$

式中： x_i 为 0-1 变量，表示节点 i 是否配置 SPMU； Ω_i 为节点 i 的邻接节点集合。

2.2 子阶段优化配置模型

考虑到在实际工程应用中监测装置往往不能一次配置到位，一般存在多个建设周期，且各周期有预期安装数目。因此本文将全周期分割为 K 个建设阶段，各阶段预期安装数目为 m_k ，以建设阶段系统可观测程度最大（即系统可观测节点数最多）、节点监测关键度最高为目标，以 SPMU 子阶段安装数目为约束，建立如式 (26) 所示的子阶段优化配置模型：

$$\begin{cases} \max \left(\sum_{i=1}^{N_B} b_i + \sum_{i=1}^{N_B} C_i x_i \right) \\ \text{s.t. } \sum_{j \in \Omega_i} x_j \geq b_i \\ \sum_{i=1}^{N_B} x_i = m_k, k = 1, 2, \dots, K \end{cases} \quad (26)$$

式中： b_i 为 0-1 变量，表示节点 i 是否可观测。 K 阶段后，系统即可实现全局可观。

各阶段配置方案 Q^k 满足如下关系：

$$Q^1 \cup Q^2 \cup \dots \cup Q^K = Q^K \quad (27)$$

2.3 零注入节点的影响

在实际应用中，若能计及零注入节点影响，将有效减少 SPMU 配置的数量^[13,23]。考虑零注入节点后，全周期优化配置模型可更改为：

$$\begin{cases} \min \left(\sum_{i=1}^{N_B} x_i - \sum_{i=1}^{N_B} C_i x_i \right) \\ \text{s.t. } \sum_{j \in \Omega_i} x_j + \sum_{j \in \Omega_i} z_j u_{ij} \geq 1 \\ \sum_{i \in \Omega_j} u_{ij} = z_j \\ x_i \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (28)$$

式中: z_j 为 0-1 变量, 表示节点 j 是否为非零注入节点; u_{ij} 为辅助变量。

同理, 考虑零注入节点影响后, 子阶段优化配置模型应修改为:

$$\begin{cases} \max \left(\sum_{i=1}^{N_B} b_i + \sum_{i=1}^{N_B} C_i x_i \right) \\ \text{s.t.} \sum_{j \in \Omega_i} x_j + \sum_{j \in \Omega_i} z_j u_{ij} \geq b_i \\ \sum_{i \in \Omega_j} u_{ij} = z_j \\ \sum_{i=1}^{N_B} x_i = m_k, k = 1, 2, \dots, K \end{cases} \quad (29)$$

通过整数线性规划求解式 (28)(29) 即可得到 SPMU 多阶段配置方案。

本文所提 SPMU 优化配置方法流程图如图 1 所示。

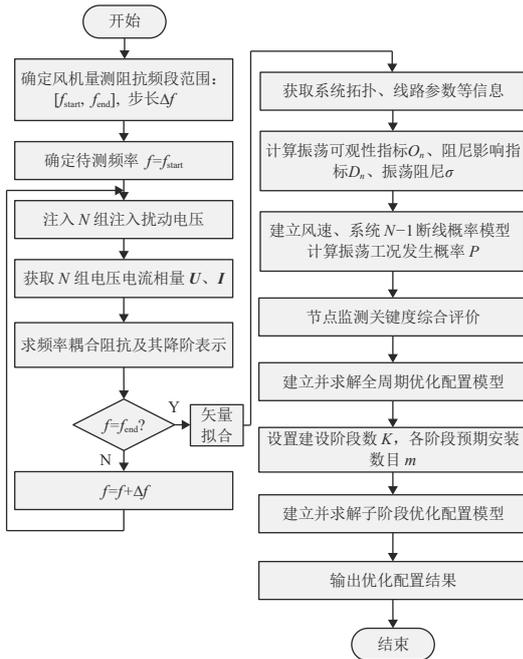


图 1 优化配置流程

Fig. 1 Flowchart of the multi-stage optimal configuration

3 算例分析

本文采用美国得克萨斯州 ERCOT 系统、改进的 New England 39 节点系统验证所提算法的有效性和经济性。

3.1 ERCOT 系统

算例 I 基于美国得克萨斯州 ERCOT 系统,

在 PSCAD/EMTDC 平台搭建了系统的电磁暂态模型分别对振荡可观性指标、阻尼影响指标的准确性进行验证。系统拓扑结构如图 2 所示。风电场 WF1~WF5 风机台数如表 1 所示, 各风电场风速 8 m/s, 节点 5、6 间固定串联补偿器补偿容量为 25%。通过计算系统聚合阻抗零点可知本例中只有在线路 5-8 断线的工况下会发生次同步振荡 (振荡模态 $\lambda=0.70 \pm j162.55$)。

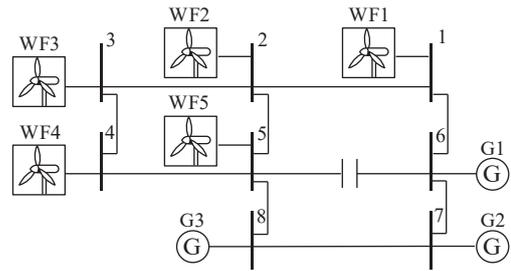


图 2 ERCOT 风电系统

Fig. 2 ERCOT wind power system

表 1 各风电场风机台数

Table 1 The amount of wind turbine generators in each wind farm

风电场	风机台数/台	风电场	风机台数/台
WF1	250	WF4	360
WF2	320	WF5	320
WF3	340		

本文通过在系统稳定运行后断开线路 L5-8 引发次同步振荡, 测量系统各支路振荡电流并计算了各支路振荡可观指标, 与利用 1.2.1 节所述方法求得振荡可观指标进行对比以验证振荡可观指标的准确性。各支路振荡电流、振荡可观性指标的仿真和理论对比结果如表 2 所示。

可见, 理论与仿真结果一致, 验证了利用 1.2.1 节所述方法求得各支路可观性指标的准确性。

鉴于阻尼影响指标的定义为阻尼灵敏度绝对值的相对大小, 而阻尼灵敏度定义为节点阻抗变化 10% 时引起的系统阻尼变化量。因此阻尼影响指标的准确性取决于系统阻尼的计算结果, 只需系统振荡模式计算结果准确即可保证阻尼影响指标的准确性。为此, 本文在 5s 时断开线路 L5-8 引发次同步振荡, 以验证系统振荡模式计算的准确性。振荡电流波形如图 3 所示。通过对比系统振荡模态计算结果 ($\lambda=0.70 \pm j162.55$) 与图 3 所示的时域分析结果, 证明了振荡模式计算的准确性,

表 2 支路振荡电流、可观指标

Table 2 Oscillation current and observability index of each branch

支路	振荡电流/A	可观指标 (仿真)	可观指标 (理论)
WF1-L1	12.9092	0.0122	0.0122
L1-2	95.15	0.0897	0.0892
WF2-L2	34.04	0.0321	0.0322
L2-3	31.4	0.0296	0.0299
WF3-L3	39.25	0.0370	0.0372
L3-4	56.32	0.0531	0.0529
WF4-L4	47.18	0.0445	0.0447
L4-5	98.48	0.0928	0.0926
WF5-L5	49.92	0.0470	0.0472
L2-5	92.9	0.0875	0.0872
L5-6	232.94	0.2195	0.2191
L6-2	87.99	0.0829	0.0827
G1-L6	182.71	0.1722	0.1729
L6-7	0	0.0000	0.0000
G2-L7	0	0.0000	0.0000
L7-8	0	0.0000	0.0000
G3-L8	0	0.0000	0.0000

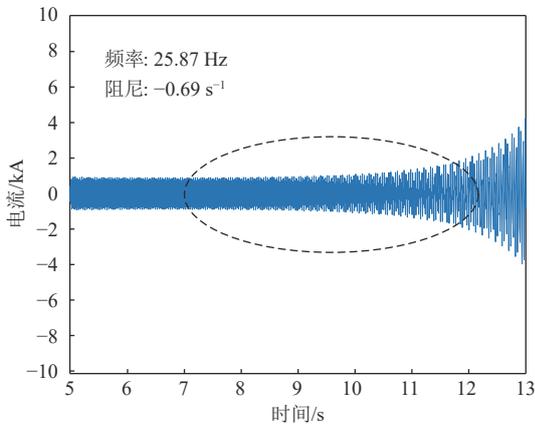


图 3 振荡电流波形

Fig. 3 Oscillation current waveform

进而保证了阻尼影响指标计算结果的准确性。

3.2 改进的 New England 39 节点系统

算例 II 基于改进的 New England 39 节点系统验证所提优化配置方法，系统如图 4 所示。

本文分析了如表 3 所示的典型工况下系统次同步振荡风险。

本例中，平均风速 v_0 、风速标准差 r 分别取 6.42812、3.04964。对具有次同步振荡风险的工况，

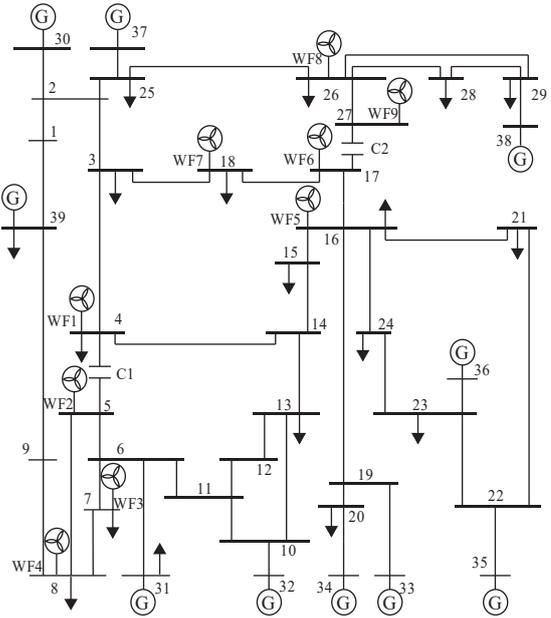


图 4 改进的 New England 39 节点系统

Fig. 4 The modified New England 39-bus system

表 3 典型工况设置情况

Table 3 Setting for typical working condition

		方案A	方案B	方案C
风速设置/(m/s)		7	8	9
补偿容量设置/%	C1	15	20	25
	C2	20	30	35
风机台数设置/台	WF1	205	260	310
	WF2	185	240	290
	WF3	210	260	310
	WF4	175	230	280
	WF5	190	245	295
	WF6	170	225	275
	WF7	180	235	285
	WF8	200	255	305
	WF9	195	260	300

计及振荡工况概率求得系统振荡可观性指标、阻尼影响程度指标、监测关键度指标如图 5 所示。

改进的 New England 39 节点系统各线路可靠性见表 4，根据式 (33) 得到计及节点关键度的 SPMU 全周期优化配置方案 Q^k ， $Q^k = \{8, 13, 16, 18, 20, 23, 25, 27, 29\}$ 。

设建设阶段数 $K=3$ ，各阶段 SPMU 预期安装数目分别为 $m_1=m_2=m_3=3$ 。根据式 (34) 可求得计

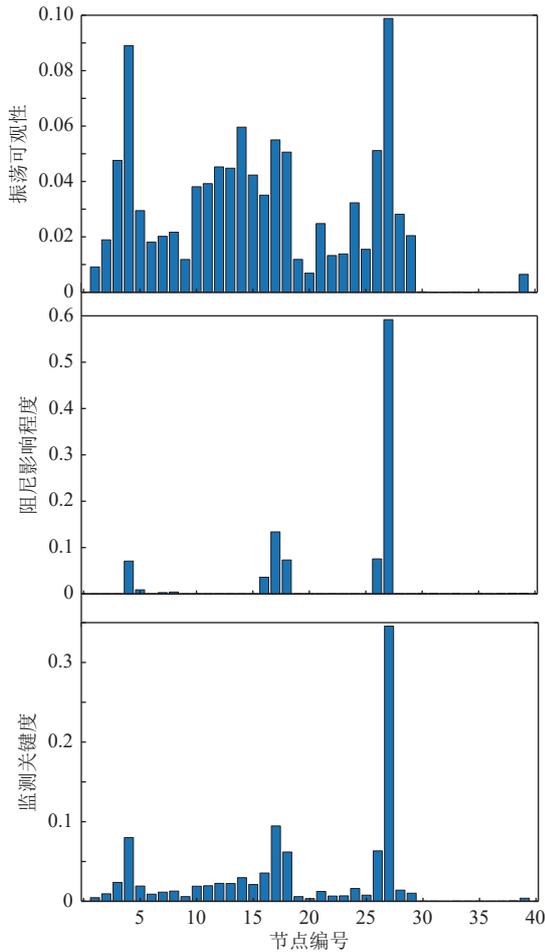


图5 系统振荡可观性指标、阻尼影响程度指标、监测关键度指标

Fig. 5 Observability index of system oscillation, damping incidence index and monitoring critical degree index

及节点关键度的 SPMU 多阶段优化配置方案，与文献 [24] 所提 PMU 多阶段优化配置算法 (计及零注入节点，未计及节点关键度) 进行对比，文献 [24] 算法求得全周期优化配置方案 $Q^K = \{4, 8, 11, 16, 17, 23, 25, 29, 34\}$ ，对比结果如表 5 所示。

本文提出的算法能够使得 SPMU 配置方案节点关键度更高，即能保证 SPMU 配置在更为关键的节点 (如节点 27) 上，且未增加所需 SPMU 数目。可见，所提方法在保证配置方案的经济性的前提下，保证了 SPMU 配置在更为关键的节点上且使得各阶段监测系统可观测程度最高。

4 结论

本文针对高比例风电接入下次同步振荡监测系统提出了较为完善的监测装置配置方法。首先，为计及风电机组次、超同步频率耦合效应，本文

表 4 系统各线路可靠性
Table 4 Reliability of each line

送端母线	受端母线	R_k	送端母线	受端母线	R_k
1	2	0.993 8	14	15	0.993 6
1	39	0.991 4	15	16	0.992 0
2	30	0.994 5	16	17	0.996 1
2	25	0.995 0	16	19	0.992 7
2	3	0.996 5	16	21	0.993 2
3	4	0.990 6	16	24	0.992 7
3	18	0.995 5	17	18	0.989 8
4	14	0.990 3	17	27	0.996 9
4	5	0.996 8	19	33	0.995 6
5	8	0.990 5	19	20	0.991 4
6	11	0.996 0	20	34	0.990 9
6	7	0.991 8	21	22	0.994 6
6	5	0.996 4	22	35	0.993 3
6	31	0.990 1	22	23	0.992 3
7	8	0.996 9	23	36	0.990 9
8	9	0.993 5	23	24	0.996 9
9	39	0.996 9	25	37	0.991 7
10	32	0.993 2	25	26	0.996 6
10	11	0.994 5	26	29	0.991 2
10	13	0.994 2	26	28	0.997 0
12	11	0.996 7	26	27	0.993 6
12	13	0.993 7	28	29	0.991 0
13	14	0.995 6	29	38	0.994 8

表 5 不同算法下的 SPMU 配置情况
Table 5 SPMU configurations of different algorithms

	建设阶段	配置节点	累计关键度	可观测程度
文献[24]算法	阶段I	8, 16, 29	0.0585 8	24
	阶段II	11, 23, 25	0.0927 8	33
	阶段III	4, 17, 34	0.2674 5	39
本文算法	阶段I	8, 13, 16	0.0707 5	24
	阶段II	23, 25, 29	0.0955 7	34
	阶段III	18, 20, 27	0.5065 3	39

节点关键度指标的计算均基于二维频率耦合阻抗模型，继而提出了客观、完善的节点监测关键度指标评价体系；其次，建立了计及节点监测关键度、振荡工况发生概率 SPMU 多阶段优化配置模型，更符合工程应用中常存在的分阶段安装的实际情况；最后，以高比例风电系统次同步振荡问题为例，依托美国得克萨斯州 ERCOT 系统、改

进的 New England 39 节点系统,验证了所提算法的可行性和经济性。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院新闻办公室.《新时代的中国能源发展》白皮书[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/2020-12/21/content_5571916.htm.
- [2] 中华人民共和国国务院. 国务院关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-02/22/content_5588274.htm.
- [3] 王洋, 杜文娟, 王海风. 风电并网系统次同步振荡频率漂移问题[J]. 电工技术学报, 2020, 35(1): 146–157. WANG Yang, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Frequency drift of sub-synchronous oscillation in wind turbine generator integrated power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(1): 146–157 (in Chinese).
- [4] 薛安成, 付潇宇, 乔登科, 等. 风电参与的电力系统次同步振荡机理研究综述和展望[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(09): 118–128. XUE Ancheng, FU Xiaoyu, QIAO Dengke, *et al.* Review and prospect of research on sub-synchronous oscillation mechanism for power system with wind power participation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(09): 118–128 (in Chinese).
- [5] 马宁宁, 谢小荣, 贺静波, 等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4720–4732. MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, *et al.* Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4720–4732 (in Chinese).
- [6] 张超, 王维庆, 王海云, 等. 风火打捆外送系统220 kV电网次同步振荡监控策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 138–144. ZHANG Chao, WANG Weiqing, WANG Haiyun, *et al.* Study on monitoring and control strategy of subsynchronous oscillation for 220 kV power grid in wind-thermal-bundled transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 138–144 (in Chinese).
- [7] 张陵, 李君芝, 杨金成, 等. 风电汇集地区次同步振荡控制系统的研究[J]. 高压电器, 2019, 55(3): 199–207. ZHANG Ling, LI Junzhi, YANG Jincheng, *et al.* Research on subsynchronous oscillation control system for wind power integration areas[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(3): 199–207 (in Chinese).
- [8] 马闻达, 王西田, 解大. 大规模风电场并网系统次同步振荡功率传播特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5217–5229. MA Wenda, WANG Xitian, XIE Da. Characteristics of subsynchronous oscillation Power Propagation in the large-scale wind farm integrated system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5217–5229 (in Chinese).
- [9] 吴艳平, 姚建国, 常乃超, 等. 多功能宽频测量装置的设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 136–141. WU Yanping, YAO Jianguo, CHANG Naichao, *et al.* Design and implementation of multi-functional wide-frequency measurement device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 136–141 (in Chinese).
- [10] 靳宗帅, 张恒旭, 石访, 等. 宽频带同步测量技术与应用[J/OL]. 中国电机工程学报 1–11[2021-08-06]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.202203>. JIN Zongshuai, ZHANG Hengxu, SHI Fang, *et al.* Synchronized wideband measurement technology and its applications[J]. Proceedings of the CSEE: 1–11[2021-08-04] (in Chinese). <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.202203>.
- [11] 吴琛, 马宁宁, 刘旭斐, 等. 高比例新能源电力系统多模态振荡监测方法及装置设计[J/OL]. 电网技术: 1–9[2021-08-04]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.19.02>. WU Chen, MA Ningning, LIU Xufei, *et al.* Monitoring method and device design of multimodal oscillation in high-proportion renewable power systems[J]. Power System Technology: 1–9[2021-08-04]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.19.02> (in Chinese).
- [12] 王杨, 晁苗苗, 谢小荣, 等. 基于同步相量数据的次同步振荡参数辨识与实测验证[J/OL]. 中国电机工程学报: 1–12[2021-08-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20210727.1605.006.html>. WANG Yang, CHAO Miaomiao, XIE Xiaorong, *et al.* Identification of subsynchronous oscillation parameters and field tests based on PMU data[J]. Proceedings of the CSEE: 1–12[2021-08-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20210727.1605.006.html> (in Chinese).
- [13] 王杨, 宋子宏, 占颖, 等. 风电并网系统次同步振荡监测装置优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(13): 141–150. WANG Yang, SONG Zihong, ZHAN Ying, *et al.* Optimal placement method for subsynchronous oscillation monitoring devices in grid-connected wind power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(13): 141–150.

- 141–150(in Chinese).
- [14] LIU W, XIE X, ZHANG X, *et al.* Frequency-coupling admittance modeling of converter-based wind turbine generators and the control-hardware-in-the-loop validation[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2020, 35(1): 425–433.
- [15] 刘威, 段荣华, 谢小荣, 等. 直驱风电机组频率耦合阻抗模型的辨识[J]. *电网技术*, 2020, 44(08): 2868–2874.
LIU Wei, DUAN Ronghua, XIE Xiaorong, *et al.* Identification of frequency-coupled impedance model for direct-drive wind turbine[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(08): 2868–2874(in Chinese).
- [16] RYGG A, MOLINAS M, ZHANG C, *et al.* On the equivalence and impact on stability of impedance modeling of power electronic converters in different domains[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2017, 05(04): 1444–1454.
- [17] GUSTAVSEN B, SEMLYEN A. Simulation of transmission line transients using vector fitting and modal decomposition[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1998, 13(2): 605–614.
- [18] ZHAN Y, XIE X, WANG Y. Impedance network model based modal observability and controllability analysis for renewable integrated power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021, 36(04): 2025–2034.
- [19] WANG J Z, HU J M, MA K L. Wind speed probability distribution estimation and wind energy assessment[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 60: 881–899.
- [20] 张家安, 仇实, 宋关羽, 等. 考虑时序波动的风速分布描述方法[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(08): 330–336.
ZHANG Jiaan, QIU Shi, SONG Guanyu, *et al.* Wind speed distribution description method considering time series fluctuation[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2020, 41(08): 330–336(in Chinese).
- [21] GOMEZ O, RIOS M A, ANDERS G. Reliability-based phasor measurement unit placement in power systems considering transmission line outages and channel limits[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2014, 8(1): 121–130.
- [22] MOHAMMAD H R K, MOHAMMAD H H. A general PMU placement approach considering both topology and system aspects of contingencies[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2020, 118(2): 105774.
- [23] AMINIFAR F, KHODAEI M, FOTUHI-FIRUZABAD M, *et al.* Contingency-constrained PMU placement in power networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2010, 25(01): 516–523.
- [24] DUA S, DAMBHARE R, GAJBHIYE R K, *et al.* Optimal Multistage Scheduling of PMU Placement: An ILP Approach[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, 23(04): 1812–1820.

收稿日期: 2021-09-08

作者简介:

易善军(1975), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析与控制, E-mail: hitysj@163.com;

项颂(1985), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析与控制, E-mail: xiangsong_md@126.com;

苏鹏(1989), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析与控制, E-mail: supeng630@126.com;

王杨(1990), 男, 博士, 研究员, 研究方向为新型电力系统电能质量分析与控制, 宽频振荡广域监测、溯源与抑制, 非线性控制理论在新型电力系统中的应用, E-mail: fwang@scu.edu.cn;

宋子宏(1997), 男, 硕士研究生, 通信作者, 研究方向为新能源并网、电力系统广域监测与控制研究, E-mail: songzihong@stu.scu.edu.cn。