第 50 卷 第 1 期：406-413　　高电压技术　　Vol.50, No.1: 406-413
2024 年 1 月 31 日　　High Voltage Engineering　　January 31, 2024
**DOI**: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221648

# 新能源电力系统频率时空分布特性分析

马宁嘉[1]，谢小荣[1]，孙谊媊[2]，王　衡[2]，秦晓辉[3]
（1. 电力系统及发电设备控制与仿真国家重点实验室(清华大学电机系)，北京 100084;
2. 国网新疆电力有限公司，乌鲁木齐 830063；3. 中国电力科学研究院有限公司，北京 100180）

**摘　要**：随着新能源和电力电子装备在电力系统中的占比快速提升，系统的频率动态特性发生重大变化。为了研究新能源机组并网对新型电力系统频率时空分布特性的影响：首先，建立了新能源电力系统的频率动态响应解析模型，并分析了频率时空分布特性的影响因素及新能源并网对该特性的影响机理；其次，讨论了研究频率时空分布特性的必要性及描述该特性的量化指标；最后，基于仿真结果分析了不同电网形态下的频率时空分布特性，并总结了新能源机组并网对该特性的影响规律。

**关键词**：新能源；电力系统；频率响应；时空分布特性；解析模型；量化指标

## Analysis of Frequency Space-time Distribution Characteristics of Power Systems with Renewables

MA Ningjia[1], XIE Xiaorong[1], SUN Yiqian[2], WANG Heng[2], QIN Xiaohui[3]
(1. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment, Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830063, China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100180, China)

**Abstract**: With the increasing penetration of renewable energy and power electronic equipment, the frequency characteristics of power systems have been significantly changed. This paper analyzes the influence of renewable energy on the frequency space-time distribution characteristics of power systems. Firstly, a mathematical model of the frequency dynamic response of power systems with renewables is established. Meanwhile, the influencing factors of frequency space-time distribution and the mechanism of the renewable energy affecting this characteristic are analyzed. Next, the necessity and the quantitative indices for the evaluation of frequency distribution are briefly reviewed. Finally, based on the simulation results, the characteristics of frequency responses in different structure of grids are analyzed, and the influence of the access of renewable energy on the frequency space-time distribution characteristics is studied.

**Key words**: renewable energy; power systems; frequency dynamics; time-space distribution features; mathematical model; quantitative indices

## 0　引言

电力系统在运行时始终受到外部扰动作用，如负荷变化、机组开停、线路投切、短路及断线故障等。扰动会导致系统功率不平衡，频率响应出现过渡过程，并表现出显著的时空分布特性[1-2]，即频率随时间变化的同时也因观测的节点不同而各异。近年来，随着新能源和电力电子装备占比的不断提高，电力系统的频率安全稳定性发生重大变化[3]。因此研究新能源电力系统的频率时空分布特性，对提高系统频率稳定性，合理规划新能源机组并网，采取调频策略等具有重要意义[4-5]。

目前国内外针对新能源和电力电子装备并网对系统频率稳定性的影响已经开展了较多研究。文献[6]基于经典的系统频率响应模型，提出了含风电电力系统的频率响应解析模型，推导了系统受有功功率扰动后频率响应的解析式；文献[7]基于频率传递函数模型，量化分析了新能源渗透率对系统频率响应指标的影响趋势。但以上研究均基于系统中各节点/母线频率一致的假设展开，没有考虑到频率的

**基金资助项目**：国家电网有限公司科技项目(高比例新能源电力系统的频率电压支撑与调节能力研究)(5100-202055392A-0-0-00)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (Research on Frequency and Voltage Support and Regulation Capability of High-penetration Renewable Power System) (5100-202055392A-0-0-00).

时空分布特性。文献[8]从波动理论角度分析了大规模风电接入对频率分布特性的影响，主要针对扰动在电网中的传播速度和机组的频率响应顺序。文献[9-10]对实际的新能源系统频率响应进行了仿真分析，但由于系统结构复杂、电气元件参数存在差异，系统频率变化错综复杂，无法从中得出新能源并网对系统频率时空分布特性影响的一般性规律。文献[11-12]基于广域测量系统技术研究互联电网的频率时空分布特性，但是难以应用于实际的大型互联电网。文献[13]基于时间序列数据挖掘方法以及 $K$ 最近邻(K-nearest neighbor, KNN)分类算法研究分析了广域电网的频率时空分布特性，但是主要针对的是传统电力系统，没有考虑新能源机组的影响。

因此，为了研究分析新能源机组并网对电力系统频率时空分布特性的影响，本文结合新能源电力系统中各组成部分的频率响应特性，建立了计及时空分布特性的频率动态解析模型，并基于该模型分析了新能源电力系统频率时空分布特性的影响因素和新能源机组并网对该特性的影响机理。然后，在整合已有的频率时空分布特性量化指标的基础上，提出了量化系统频率分散程度的指标。之后，对不同结构的新能源电力系统频率响应进行了仿真，分析并总结了新能源机组接入对系统频率时空分布特性的影响规律。

## 1 新能源电力系统频率动态建模

为建立含新能源机组的电力系统频率动态模型，首先做出以下基本假设：1）采用线性化频率响应模型[14]；2）忽略无功-电压环节对机电暂态中频率响应的影响，即仅考虑发电机的转子惯性和调速系统的作用。本章对新能源电力系统中各部分进行分析。

### 1.1 网络功率-频率响应模型

由于系统中各节点电压基本都在额定值附近且各节点间的相角差也较小，因此可用节点导纳矩阵来近似地描述系统中的功率与节点电压相角之间的关系[15]，即网络方程为：

$$\Delta \boldsymbol{P}_{\Sigma} = \boldsymbol{B} \cdot \Delta \boldsymbol{\theta} \tag{1}$$

式中：$\Delta \boldsymbol{P}_{\Sigma}$ 为各节点注入电网的有功功率组成的向量；$\boldsymbol{B}$ 为节点电纳矩阵；$\Delta \boldsymbol{\theta}$ 为各节点相角组成的向量。

假设在系统中共有($N$+$M$)个节点，其中节点 1—$N$ 为非发电机节点(以下简称为一般节点)，节点($N$+1)—($N$+$M$)为发电机内节点，可知 $N \geq M$。假设一般节点中节点 1—$M$ 分别与 $M$ 个发电机内节点直接相连。将式(1)中的各矩阵按节点类型分块，可得：

$$\begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{P}_{\Sigma \mathrm{L}} \\ \Delta \boldsymbol{P}_{\Sigma \mathrm{G}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{B}_{\mathrm{LL}} & \boldsymbol{B}_{\mathrm{LG}} \\ \boldsymbol{B}_{\mathrm{GL}} & \boldsymbol{B}_{\mathrm{GG}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta}_{\mathrm{L}} \\ \Delta \boldsymbol{\theta}_{\mathrm{G}} \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中：$\Delta \boldsymbol{P}_{\Sigma \mathrm{L}}$、$\Delta \boldsymbol{P}_{\Sigma \mathrm{G}}$ 分别为一般节点和发电机节点注入电网的功率增量向量；$\Delta \boldsymbol{\theta}_{\mathrm{L}}$、$\Delta \boldsymbol{\theta}_{\mathrm{G}}$ 为 2 类节点的相角增量向量；$\boldsymbol{B}_{\mathrm{LL}}$、$\boldsymbol{B}_{\mathrm{LG}}$、$\boldsymbol{B}_{\mathrm{GL}}$ 和 $\boldsymbol{B}_{\mathrm{GG}}$ 为矩阵 $\boldsymbol{B}$ 中与节点类型对应的分块矩阵。

### 1.2 发电机功率-频率响应模型

常规同步发电机 $i$ 可认为其输出功率 $\Delta P_{\mathrm{G}i}$ 与发电机内节点转子角频率 $\Delta f_{\mathrm{G}i}$ 满足一定的关系，即：

$$\Delta P_{\mathrm{G}i} = G_{\mathrm{G}i}(s)\Delta f_{\mathrm{G}i} = sG_{\mathrm{G}i}(s)\Delta \theta_{\mathrm{G}i} \tag{3}$$

式中：$G_{\mathrm{G}i}(s)$ 表示同步发电机 $i$ 的功率-频率响应关系，包括发电机转子运动方程和原动机及其调速子系统。

由于具体的涡轮机模型和调速器控制环节不是本文关注的重点，因此可采用简化后的模型来表示同步发电机的频率响应模型[7,16]。例如传统火电机组 $i$ 的功率-频率响应的关系可用考虑再热环节的模型近似表示，其结构图如图 1 所示[17]。图 1 中：$T_{\mathrm{J}i}$ 为同步机 $i$ 的惯性时间常数；$D_{\mathrm{S}i}$ 为机组阻尼系数；$K_{\mathrm{G}i}$ 为调速器的一次调频系数；$F_{\mathrm{H}i}$ 为高压缸的功率比例；$T_{\mathrm{R}i}$ 为再热时间常数。

以风电、光伏为主的新能源机组的频率响应特性与传统同步机组截然不同。新能源机组主要是通过电力电子变流器进行并网的，在常规的最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制下，机组的有功出力与系统频率解耦[18-19]。即当外界条件例如风速、空气密度、光照强度等影响新能源机组输出功率的参数不变时，系统频率出现波动，新能源机组 $j$ 的输出功率基本不变。因此可认为在系统频率响应过程中有：

$$\Delta P_{\mathrm{G}j} = 0 \tag{4}$$

值得一提的是，此前针对新能源参与系统调频已有大量研究[20-21]，主要方式是通过附加控制使新

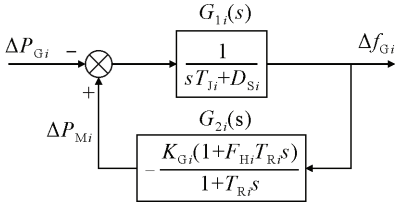



图 1 同步机组频率响应模型

Fig.1 Frequency dynamic model of synchronous generators

能源机组有功出力与网侧的频率耦合，提高系统频率支撑和调节能力。常见的调频技术包括虚拟惯量控制、转子超速控制以及综合控制方法等[22]。针对附加调频控制的新能源机组频率响应特性建模方法的研究正处于发展阶段，主要可分为模型分析法和机器学习法[23-24]。其中模型分析法是在已知新能源机组类型和附加控制方法的基础上，对机组的频率响应特性进行建模。如文献[23]推导并分析了直驱永磁风力发电机组附加综合调频控制的响应模型。但新能源调频控制种类繁多且往往难以事先获得其控制结构，而机器学习法可有效解决此问题，经过大量数据的训练后，该方法可辨识出机组的频率动态特征，并在线更新模型的参数，具有良好的应用前景[24]。

但是目前实际工程应用中还是以常规控制为主，且本文主要分析的是常规新能源机组对系统频率时空分布特性的影响，故暂不考虑新能源机组参与系统调频。此外，由于各类新能源机组的频率响应特性相似，并且在实际工程中风电的装机容量占比较高且技术相对成熟，因此后续对新能源机组的分析主要以风电机组为例展开。

将各发电机的功率-频率响应关系按式(2)的形式进行整合，得到：

$$\Delta \boldsymbol{P}_{\Sigma \mathrm{G}}=s \boldsymbol{G}_{\mathrm{G}} \Delta \boldsymbol{\theta}_{\mathrm{G}} \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{G}_{\mathrm{G}}$ 为各发电机功率-频率传递函数组成的矩阵，即：

$$\boldsymbol{G}_{\mathrm{G}}=\begin{bmatrix} G_{\mathrm{G1}}(s) & & & \\ & G_{\mathrm{G2}}(s) & & \\ & & \ddots & \\ & & & G_{\mathrm{G}M}(s) \end{bmatrix} \tag{6}$$

### 1.3 负荷功率-频率响应模型

忽略电压对负荷功率的影响，则一般节点 $p$ 上的负荷频率响应特性[7]可近似表示为：

$$\Delta P_{\mathrm{L}p}=K_{\mathrm{D}p} \Delta f_{\mathrm{L}p}=s K_{\mathrm{D}p} \Delta \theta_{\mathrm{L}p} \tag{7}$$

式中：$\Delta P_{\mathrm{L}p}$ 为一般节点 $p$ 上的负荷有功功率因频率响应特性产生的增量；$K_{\mathrm{D}p}$ 为负荷频率响应系数；$\Delta f_{\mathrm{L}p}$ 和 $\Delta \theta_{\mathrm{L}p}$ 分别为节点 $p$ 频率增量和相角增量。

考虑到一般节点上出现的扰动功率，并将各负荷的频率响应关系按式(2)的形式进行整合，得到：

$$\Delta \boldsymbol{P}_{\Sigma \mathrm{L}}=-\left(\Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}+s \boldsymbol{K}_{\mathrm{D}} \Delta \boldsymbol{\theta}_{\mathrm{L}}\right) \tag{8}$$

式中：$\Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}$ 为一般节点上的扰动功率组成的向量；$\boldsymbol{K}_{\mathrm{D}}$ 为负荷频率响应系数组成的矩阵，且有：

$$\boldsymbol{K}_{\mathrm{D}}=\begin{bmatrix} K_{\mathrm{D1}} & & & \\ & K_{\mathrm{D1}} & & \\ & & \ddots & \\ & & & K_{\mathrm{D}N} \end{bmatrix} \tag{9}$$

由式(2)、(5)、(8)可得：

$$\Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}=-\frac{\boldsymbol{B}_{\mathrm{LG}}\left(s \boldsymbol{G}_{\mathrm{G}}-\boldsymbol{B}_{\mathrm{GG}}\right)^{-1} \boldsymbol{B}_{\mathrm{GL}}+\boldsymbol{B}_{\mathrm{LL}}+s \boldsymbol{K}_{\mathrm{D}}}{s} \Delta \boldsymbol{f}_{\mathrm{L}} \tag{10}$$

式中：$\Delta \boldsymbol{f}_{\mathrm{L}}$ 为一般节点的频率变化量。

可见，电力系统中频率时空分布特性的主要影响因素包括：1）扰动功率的大小和位置；2）各发电机输出功率-频率响应关系，即 $\boldsymbol{G}_{\mathrm{G}}$ 矩阵，其中包括同步发电机的惯量支撑和一次调频以及新能源机组提供的虚拟惯量和调频控制；3）系统中各节点与各发电机、扰动节点的相对位置与电气距离；4）系统中各负荷的频率响应特性。新能源机组的接入主要影响的是发电机功率-频率响应关系以及系统中各节点与该发电机节点的电气距离，从而改变了系统的频率时空分布特性。

此外，惯性中心(center of inertia, COI)频率响应[16]对分析电力系统频率响应特性具有参考价值，其定义为：

$$f_{\mathrm{COI}}=\frac{\sum_{j=N+1}^{N+M} T_{\mathrm{J}j} f_j}{\sum_{j=N+1}^{N+M} T_{\mathrm{J}j}} \tag{11}$$

式中：$f_{\mathrm{COI}}$ 为系统惯性中心频率；$T_{\mathrm{J}j}$ 为发电机 $j$ 的惯性时间常数；$f_j$ 为发电机 $j$ 的转子角频率。

## 2 频率时空分布特性及其量化指标

### 2.1 研究频率时空分布特性的必要性

在新型电力系统频率稳定性方面，亟需研究新能源大规模并网带来的 2 个重大问题[7]：1）从系统整体规划来看，需研究系统频率响应特性随新能源渗透率不断增长的变化趋势，进而预估系统可接受的不参与调频电源的最大占比；2）从新能源机组自身来看，需选择合适的调频方式以有效提升系统频率稳定性，充分发挥新能源场站的作用。

针对上述研究需求，分析频率时空分布特性的必要性主要体现在：1）扰动发生后，系统中各节点以及 COI 的最大频率偏差和频率变化率(rate of change of frequency, RoCoF)并不相同，因此以这两个指标为约束条件进行上述评估时，可能会出现系统COI频率响应满足约束条件但部分节点不满足的

情况，从而产生误判。2）传统电力系统中，频率时空分布受网络结构及故障地点等多种因素影响[25-27]；而新能源占比不断增加，机组类型、接入位置和输出功率波动性等使得频率的时空分布特性更加复杂。3）考虑频率的时空分布还有利于优化设计新能源机组调频方式和参数。

### 2.2 频率时空分布特性量化指标

为了量化分析电力系统的频率时空分布特性，可采用以下指标来描述各节点的频率响应[28]：1）最大频率变化率，即扰动发生后频率快速下降区段内频率下降数值与对应时间宽度之比；2）频率响应延时，即扰动后频率变化量第1次达到阈值$\pm\Delta f_{\mathrm{th}}$(设为 0.01 Hz)的时刻$t_{ri}$与扰动发生时刻$t_0$之差，即$\Delta t_{ri}=t_{ri}-t_0$；3）最大频率偏差$\Delta f_{\max,i}$及其延时$\Delta t_{\max,i}=t_{\max,i}-t_0$，其中$t_{\max,i}$为节点$i$频率变化量达到$\Delta f_{\max,i}$的时刻。

此外，以上指标是从各节点的频率响应差异来量化频率的时空分布特性。为表征整个系统中频率响应的“分散程度”，定义指标：

$$S=\sum_{i=1}^{N}\frac{\left(\Delta f_{\max,i}-\Delta f_{\max,\mathrm{COI}}\right)^2}{N\Delta P_{\mathrm{d}}} \tag{12}$$

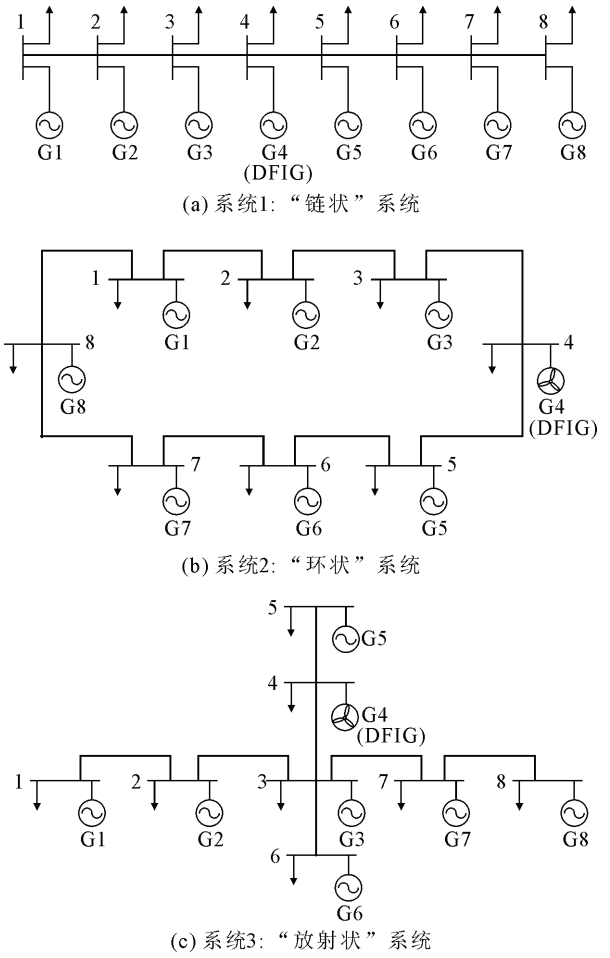
式中：$\Delta f_{\max,\mathrm{COI}}$为系统惯性中心最大频率偏差；$\Delta P_{\mathrm{d}}$为初始功率扰动；$N$为节点数量。指标$S$在一定程度上体现了频率响应分布性的显著程度，即$S$值越大，系统频率响应的时空分布就越显著。

## 3 仿真分析

### 3.1 研究对象系统

频率的时空分布特性与电网结构密切相关，虽然实际电网的结构复杂，但是若将大规模互联系统中各区域电网进行单机带负荷等值，则可将系统的拓扑结构进行简化[8]，并可以将常见的实际系统大致分为如图2所示的3种基本结构。下面主要针对这3个系统进行分析，并根据其结构特征分别称为“链状”、“环状”和“放射状”系统。由于系统的结构进行了简化，所以可以更好地观察频率的时空分布、探究新能源机组接入对频率响应的影响。

在以上3个系统中，各系统的基准容量为100 MVA，基准电压为220 kV，基准频率为50 Hz，相邻两个母线间的线路电抗标幺值为0.02；系统中各火电机组的额定功率为660 MW，同步电机惯性时间常数为10 s，汽轮机调频系数为20；G4是由若干台风电机组组成的风电场，风力机单机额定容量为4 MW，聚合数量为165台，总有功出力为660 MW；节点1—8处的负荷有功功率为400 MW，暂不考虑系统中无功功率对电网频率的影响，即所有负荷的无功功率为零。可以看出，在“链状”系统中能够更清晰的观测到扰动产生的影响在电网中地传播现象；“环状”系统也可以较好地观测到扰动的传播，相比前者其节点间联系的紧密程度有所增加；“放射状”系统的结构更接近目前大多数新能源场站接入电网的情况。



(a) 系统1：“链状”系统

(b) 系统2：“环状”系统

(c) 系统3：“放射状”系统

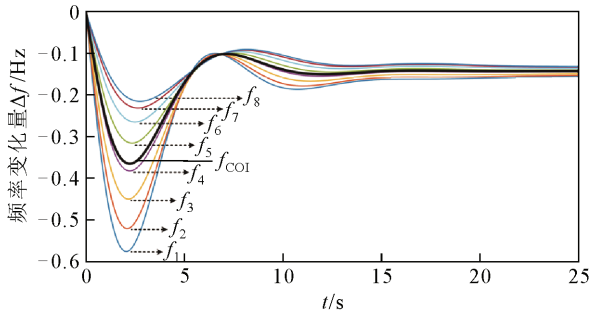
图2 3个不同结构的电力系统

Fig.2 Three power systems with different structures

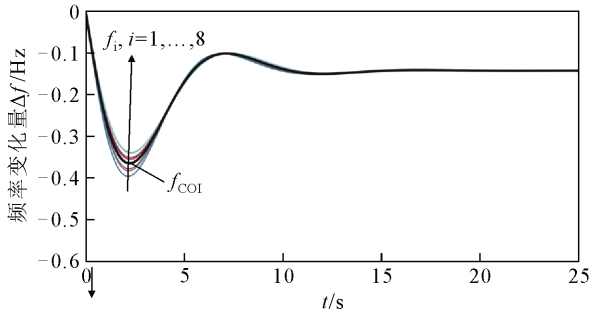
基于式(10)在Matlab/Simulink中对3种系统的频率响应进行建模，下面将基于此模型对新能源电力系统频率的时空分布特性进行仿真分析。

### 3.2 对象系统频率响应分析

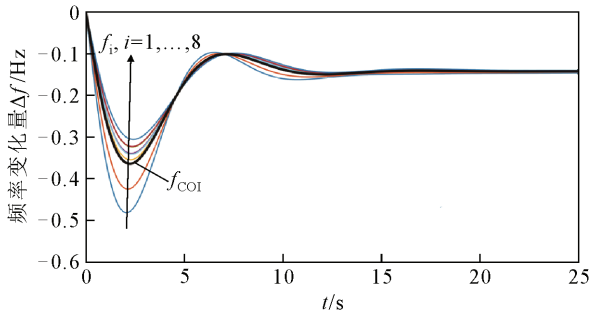
假设分别在3个系统的节点1处负荷有功功率突增系统总负荷的5%，仿真得到系统频率响应如图3所示，各节点频率响应对应的量化指标见表1—表3。




(a) “链状”系统频率响应




(b) “环状”系统频率响应




(c) “放射状”系统频率响应

图 3 3 个系统的频率响应曲线

Fig.3 Frequency response curves of System 1—System 3

结合每个系统中节点频率响应曲线和量化指标可见：1）各节点的频率响应延时和最大频率偏差延时与到扰动点的电气距离呈正相关；2）各节点最大频率偏差和最大频率变化率与到扰动点的电气距离呈负相关。尤其在“链状”系统中，各节点和 COI 的频率响应存在较大的差异，并且节点距离扰动点越近，低频减载、ROCOF 保护等动作就越容易被触发。

对比 3 个系统的结果可见：3 个系统的惯性中心频率响应量化指标完全一致，即网络结构的变化不会影响系统惯性中心频率响应，但是对频率时空分布特性影响十分显著，即系统中各节点在电气结构上联系越紧密，节点频率响应的差异就越小。

### 3.3 新能源机组接入影响分析

通过对比新能源机组替换同等容量的同步机组前后系统的频率响应指标变化，可以分析新能源机组对频率分布特性的影响。假设 3 个研究对象系统中的所有机组(包括 G4)均为火电机组，将节点 4 上的机组替换为同等容量的风电机组即可得到图 2 所示的 3 个系统，即系统中接入节点 4 的新能源机组可认为是替代了同等容量的火电机组。以原系统中均为火电机组的“链状”系统为例，在其他参数

表 1 “链状”系统频率响应指标

Table 1 Frequency response indices of System 1

| 节点 | 最大频率变化率/(Hz·s$^{-1}$) | 频率响应延时/s | 最大频率偏差/Hz | 最大偏差延时/s |
|---|---|---|---|---|
| 节点 1 | 0.479 | 0.022 | 0.575 | 2.060 |
| 节点 2 | 0.426 | 0.024 | 0.520 | 2.105 |
| 节点 3 | 0.360 | 0.029 | 0.450 | 2.168 |
| 节点 4 | 0.299 | 0.034 | 0.382 | 2.238 |
| 节点 5 | 0.238 | 0.043 | 0.316 | 2.357 |
| 节点 6 | 0.191 | 0.053 | 0.265 | 2.503 |
| 节点 7 | 0.161 | 0.063 | 0.231 | 2.655 |
| 节点 8 | 0.145 | 0.070 | 0.215 | 2.760 |
| COI | 0.286 | 0.036 | 0.365 | 2.238 |

表 2 “环状”系统频率响应指标

Table 2 Frequency response indices of System 2

| 节点 | 最大频率变化率/(Hz·s$^{-1}$) | 频率响应延时/s | 最大频率偏差/Hz | 最大偏差延时/s |
|---|---|---|---|---|
| 节点 1 | 0.318 | 0.032 | 0.396 | 2.164 |
| 节点 2 | 0.304 | 0.034 | 0.383 | 2.197 |
| 节点 3 | 0.284 | 0.036 | 0.364 | 2.245 |
| 节点 4 | 0.271 | 0.038 | 0.351 | 2.279 |
| 节点 5 | 0.259 | 0.040 | 0.339 | 2.318 |
| 节点 6 | 0.260 | 0.039 | 0.340 | 2.312 |
| 节点 7 | 0.276 | 0.037 | 0.355 | 2.265 |
| 节点 8 | 0.299 | 0.034 | 0.378 | 2.205 |
| COI | 0.286 | 0.036 | 0.365 | 2.238 |

表 3 “放射状”系统频率响应指标

Table 3 Frequency response indices of System 3

| 节点 | 最大频率变化率/(Hz·s$^{-1}$) | 频率响应延时/s | 最大频率偏差/Hz | 最大偏差延时/s |
|---|---|---|---|---|
| 节点 1 | 0.401 | 0.026 | 0.482 | 2.065 |
| 节点 2 | 0.345 | 0.030 | 0.426 | 2.134 |
| 节点 3 | 0.276 | 0.037 | 0.355 | 2.266 |
| 节点 4 | 0.260 | 0.039 | 0.340 | 2.308 |
| 节点 5 | 0.245 | 0.042 | 0.324 | 2.358 |
| 节点 6 | 0.262 | 0.039 | 0.342 | 2.306 |
| 节点 7 | 0.244 | 0.042 | 0.323 | 2.354 |
| 节点 8 | 0.227 | 0.045 | 0.306 | 2.414 |
| COI | 0.286 | 0.036 | 0.365 | 2.238 |

不变情况下分别考虑新能源机组替代节点 2、4、6、8 上火电机组的场景。对比新能源机组替换同步机组前后系统中各节点的频率响应，计算得到其对应的量化指标变化量如图 4 所示，其中 $RoCoF_0$ 和 $\Delta f_{max,0}$ 为替换前各节点频率响应的量化指标，图中各点纵坐标为替换后各指标的变化量。可见：在扰动不变的情况下，新能源机组通过替换同步机组接入会普遍增大系统中各节点的频率变化率和最大频率偏差，并且距离新能源机组并网点电气距离越近的节点受到的影响就越大。对“环状”系统和“放射状”系统也进行同样的分析，可得出类似的结论。

结合表征频率响应分布性显著程度的指标 $S$ 的定义和表达式，计算得到新能源机组替换同步机组前后系统的指标如表 4 所示。

可见，对于同一系统，新能源机组替换同步机组并不一定会加剧频率时空分布的显著程度，还与电网结构和并网位置有关。例如在“链状”系统中，新能源机组从节点 2、4 并网会加剧系统的频率响应分布性，而从节点 6、8 并网频率的分布性显著程度会有所降低。而在相同的新能源机组并网场景下，由于“环状”系统和“放射状”系统中各节点在电气结构上联系紧密程度高于“链状”系统，所以相同大小扰动的频率响应分布性显著程度远小于“链状”系统。

### 3.4 复杂系统仿真分析

为进一步探究新能源机组并网的影响，以改进的 IEEE 10 机 39 节点系统为例进行仿真分析。该系统有 10 台发电机、39 条母线、19 处负荷和 34 条传输线，额定频率为 60 Hz、电压等级为 345 kV。系统结构如图 5 所示，其中 6 号同步发电机被等容量的风电机组所替代。假设节点 27 处有功负荷突然增加 100 MW，得到风机替换前后各节点、系统惯性中心的初始频率变化率和最大频率偏差如图 6 所示。

由图 6 可知，新能源机组替换等容量同步机组后，系统各节点及惯性中心的频率变化率和最大频率偏差均有所增加，且各节点频率响应指标变化量差异较大。这主要是因为该系统中一般节点与发电机节点之间的网络结构复杂，且各发电机的惯量和调频能力大小存在差异。并且距离新能源机组并网点较近的节点 33、34 和 36 受到的影响较为显著，可见与新能源机组接入点的距离对频率分布存在影响。

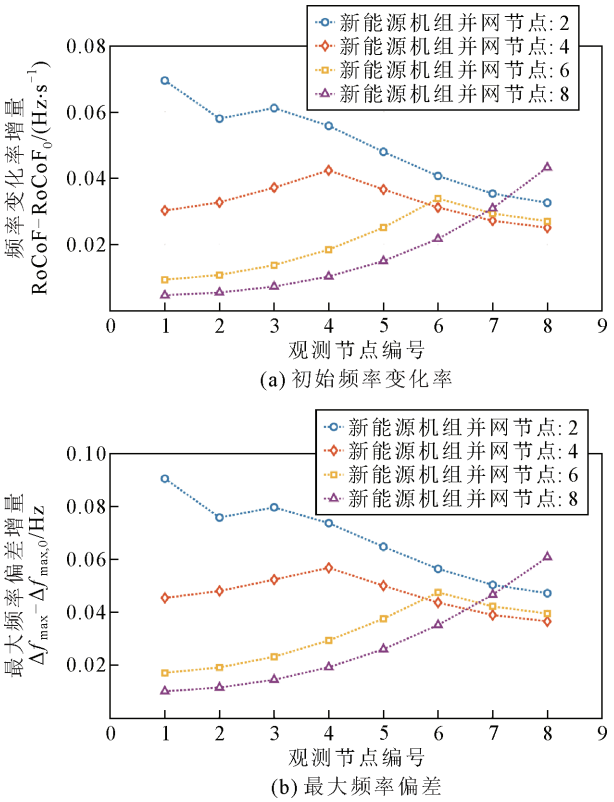



图 4 “链状”系统新能源替换前后频率量化指标变化

Fig.4 Variations in frequency response indices with renewable energy units connected to chain-like system

表 4 3 个系统频率响应分布性显著程度指标

Table 4 Index $S$ of frequency response of System 1—System 3

| 新能源并网节点 | 显著程度 | | |
|---|---|---|---|
| | 系统 1：链状 | 系统 2：环状 | 系统 3：放射状 |
| 无新能源 | 0.3182 | 0.0101 | 0.0712 |
| 节点 2 | 0.3910 | 0.0104 | 0.0736 |
| 节点 4 | 0.3214 | 0.0075 | 0.0636 |
| 节点 6 | 0.2592 | 0.0075 | 0.0696 |
| 节点 8 | 0.2393 | 0.0104 | 0.0604 |

用风机替换不同位置上的同步机组，得到不同场景下系统频率响应对应的指标 $S$ 如图 7 所示。

可见：在该系统中新能源机组接入加剧了各节点频率响应的分散程度，并且由于被替代的同步机组调频能力不同等因素的影响，不同节点接入造成的影响程度也存在差异，其中 G4 被替换后引起的频率时空分布最为显著。

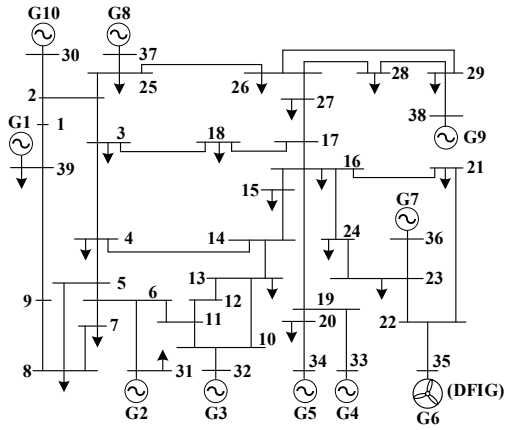



图 5 改进的 IEEE 39 节点系统结构图

Fig.5 Modified IEEE 39-bus system

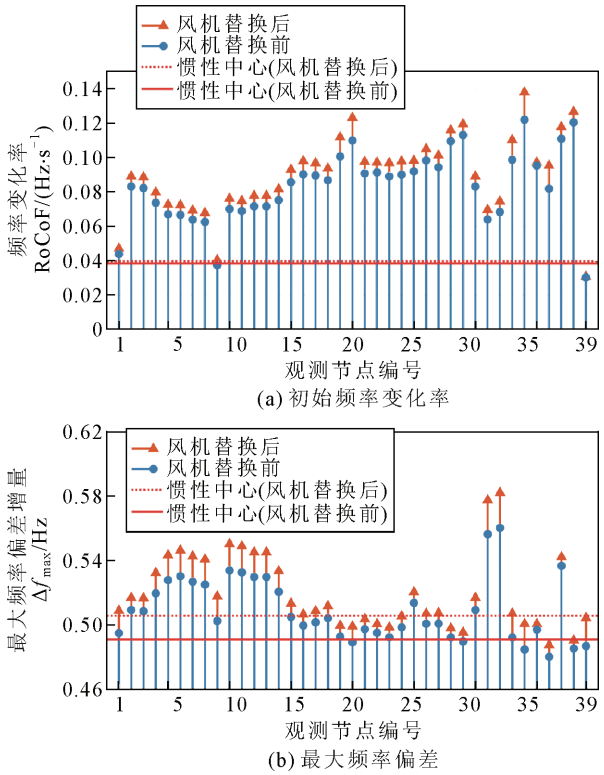



图 6 39 节点系统新能源替换前后频率量化指标

Fig.6 Variations in frequency response indices with renewable energy units connected to IEEE 39-bus system

## 4 结论

1）新能源电力系统频率响应具有显著的时空分布特性，该特性主要受扰动大小及位置、各发电机和负荷的频率响应特性以及电网结构的影响。新能源机组接入改变了电源侧的响应特性和电网结构，从而影响了频率时空分布特性。

2）电网结构的变化不会改变系统惯性中心的频率响应，但是系统中各节点之间联系的紧密程度增加有助于降低系统频率响应的分布性。

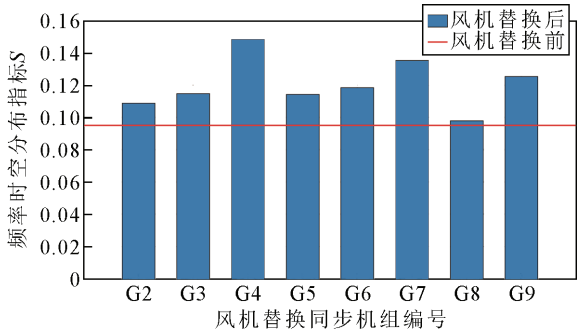



图 7 不同新能源替换方案下频率响应分布性显著程度指标

Fig.7 Index *S* with different schemes for grid connection of renewable energy units

3）新能源机组的接入会增大系统中各节点的最大频率偏差和最大频率变化率，且距离新能源机组并网点越近的节点越容易受到较大影响。另外，新能源机组的接入并不一定会加剧系统频率响应的分布性，还取决于电网的结构和机组并网位置。

后续将进一步研究新能源机组的调频控制策略对新能源系统频率动态响应及其分布特性的影响。

## 参考文献 References

[1] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(3): 720-729.

[2] 韩英铎，闵 勇，洪绍斌. 复杂扩展式电力系统功率频率动态过程分析[J]. 电力系统自动化，1992，16(1)：28-33.
HAN Yingduo, MIN Yong, HONG Shaobin. Analysis of power-frequency dynamics in large scale multi-machine power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1992, 16(1): 28-33.

[3] 郭创新，刘祝平，冯 斌，等. 新型电力系统风险评估研究现状及展望[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3394-3404.
GUO Chuangxin, LIU Zhuping, FENG Bin, et al. Research status and prospect of new-type power system risk assessment[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3394-3404.

[4] 张子扬，张 宁，杜尔顺，等. 双高电力系统频率安全问题评述及其应对措施[J]. 中国电机工程学报，2022，42(1)：1-24.
ZHANG Ziyang, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Review and countermeasures on frequency security issues of power systems with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 1-24.

[5] 文云峰，杨伟峰，林晓煌. 低惯量电力系统频率稳定分析与控制研究综述及展望[J]. 电力自动化设备，2020，40(9)：211-222.
WEN Yunfeng, YANG Weifeng, LIN Xiaohuang. Review and prospect of frequency stability analysis and control of low-inertia power systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 211-222.

[6] 薄其滨. 含风电的电力系统频率动态分析[D]. 成都：西南交通大学，2015.
BO Qibin. Analysis of power system frequency dynamic including wind energy[D]. Chengdu, China: Southwest Jiaotong University, 2015.

[7] 张剑云，李明节. 新能源高渗透的电力系统频率特性分析[J]. 中国电机工程学报，2020，40(11)：3498-3506.
ZHANG Jianyun, LI Mingjie. Analysis of the frequency characteristic of the power systems highly penetrated by new energy generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3498-3506.

[8] WANG D L, MA N N, GUO C. Characteristics of electromechanical disturbance propagation in non-uniform power systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(8): 1919-1925.

[9] 王 清. 双馈风电接入对电力系统稳定性影响机理研究[D]. 北京：华北电力大学(北京)，2016.
WANG Qing. Mechanism of the impact of DFIGs on power system stability[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2016.

[10] 张 俊，晁 勤，段晓田，等. 动态约束下的风电场最大可接入容量研究[J]. 电力系统保护与控制，2011，39(3)：62-66，73.
ZHANG Jun, CHAO Qin, DUAN Xiaotian, et al. Research on maximum access capacity of wind farm based on dynamic constraints[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 62-66, 73.

[11] 邵 帅. 基于 WAMS 的电力系统频率动态时空分布特性分析[D]. 吉林：东北电力大学，2016.
SHAO Shuai. Research on the space-time distribution characteristics of frequency dynamics based on the WAMS[D]. Jilin, China: Northeast Electric Power University, 2016.

[12] FAN Y F, YI J B, TIAN F X, et al. An improved higher-order SFR model of large-scale distributed hybrid power system[C]//5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). Chengdu, China: IEEE, 2020: 2183-2187.

[13] 谢光旭. 基于数据挖掘技术的广域电网频率分布特性研究[D]. 成都：电子科技大学，2018.
XIE Guangxu. Studies on the frequency distribution characteristics of wide-area power grid based on data mining technology[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.

[14] 闵 勇，陈 磊，姜齐荣. 电力系统稳定分析[M]. 北京：清华大学出版社，2016.
MIN Yong, CHEN Lei, JIANG Qirong. Power system stability[M]. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2016.

[15] 徐 箭，施 微，徐 琪. 含风电的电力系统动态频率响应快速评估方法[J]. 电力系统自动化，2015，39(10)：22-27，111.
XU Jian, SHI Wei, XU Qi. A fast assessment method for power system dynamic frequency response to wind power fluctuation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10): 22-27, 111.

[16] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1994: 395-428.

[17] SHI Q X, LI F X, CUI H T. Analytical method to aggregate multi-machine SFR model with applications in power system dynamic studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6355-6367

[18] 李忠文，吴 龙，程志平，等. 光储系统参与微电网频率调节的模糊自适应滑模控制[J]. 高电压技术，2022，48(6)：2065-2076.
LI Zhongwen, WU Long, CHENG Zhiping, et al. Fuzzy adaptive sliding mode control of photovoltaic and storage systems for providing frequency regulation of microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2065-2076.

[19] 鲁宗相，汤海雁，乔 颖，等. 电力电子接口对电力系统频率控制的影响综述[J]. 中国电力，2018，51(1)：51-58.
LU Zongxiang, TANG Haiyan, QIAO Ying, et al. The impact of power electronics interfaces on power system frequency control: a review[J]. Electric Power, 2018, 51(1): 51-58.

[20] 陈长青，李欣然，谭庄熙. 考虑风电不确定性的风储调频能力[J]. 高电压技术，2022，48(6)：2128-2139.
CHEN Changqing, LI Xinran, TAN Zhuangxi. Frequency modulation capability of wind storage considering wind power uncertainty[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2128-2139.

[21] 王秀丽，段子越，孟永庆，等. 分频输电系统运行特性与控制策略综述[J]. 高电压技术，2023，49(9)：3696-3707.
WANG Xiuli, DUAN Ziyue, MENG Yongqing, et al. Review on operational characteristics and control strategies of fractional frequency transmission systems[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3696-3707.

[22] 刘 巨，赵红生，李梦颖，等. 基于功率谱密度分析的新能源电力系统等效惯量评估[J]. 高电压技术，2022，48(1)：178-188.
LIU Ju, ZHAO Hongsheng, LI Mengying, et al. An equivalent inertia evaluation method of power system based on power spectral density analysis[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 178-188.

[23] 邢鹏翔，侍乔明，王 刚，等. 风电机组虚拟惯量控制的响应特性及机理分析[J]. 高电压技术，2018，44(4)：1302-1310.
XING Pengxiang, SHI Qiaoming, WANG Gang, et al. Response characteristics and mechanism analysis about virtual inertia control of wind generators[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1302-1310.

[24] 刘 芳，刘 威，汪浩东，等. 高比例新能源电力系统振荡机理及其分析方法研究综述[J]. 高电压技术，2022，48(1)：95-113.
LIU Fang, LIU Wei, WANG Haodong, et al. Review on oscillation mechanism and analysis methods of high proportion renewable energy power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 95-113.

[25] MA N N, WANG D L. Extracting spatial-temporal characteristics of frequency dynamic in large-scale power grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2654-2662.

[26] MARTÍNEZ-SANZ I, CHAUDHURI B, JUNYENT-FERRÉ A, et al. Distributed vs. concentrated rapid frequency response provision in future great Britain system[C]//2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM). Boston, USA: IEEE, 2016: 1-5.

[27] ZHANG Y C, MARKHAM P, XIA T, et al. Wide-area frequency monitoring network (FNET) architecture and applications[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(2): 159-167.

[28] 张恒旭，刘玉田. 电力系统动态频率响应时空分布特征量化描述[J]. 中国电机工程学报，2009，29(7)：64-70.
ZHANG Hengxu, LIU Yutian. Quantitative description of space-time distribution features of dynamic frequency responses[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 64-70.



**马宁嘉**
2000—，男，博士生
研究方向为电力系统稳定分析与控制
E-mail: mnj21@mails.tsinghua.edu. cn

MA Ningjia
Ph.D. candidate



**谢小荣**(通信作者)
1975—，男，博士，教授，博导
主要研究方向为电力系统振荡分析与抑制、柔性输配电系统
E-mail: xiexr@tsinghua.edu.cn

XIE Xiaorong
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2022-09-30 修回日期 2023-10-10 编辑 何秋萍