

· 专论与综述 ·

# 风电功率波动引发的强迫振荡扰动源定位方法

蒋平, 史豪, 吴熙

(东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:**电力系统中的强迫功率振荡有可能引发大范围的功率波动。风电等新能源接入电网时,其输出功率的波动具有随机性,当该功率波动导致系统中发生强迫振荡时,振荡同样会呈现随机特征,难以对扰动源进行定位。文中提出一种对风电引发的强迫振荡扰动源定位的方法,该方法利用振荡的双谱获取中心频率,并通过小波变换得到振荡中心频率处的初始相位,据此可通过能量函数对扰动源进行定位。实际算例验证了所提方法的可行性及有效性。

**关键词:**强迫振荡;扰动源定位;风力发电;双谱;小波变换

**中图分类号:** TM712

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2018)05-0001-06

## 0 引言

电力系统强迫振荡对电网的安全稳定运行有重要的影响,由系统中频率接近系统功率振荡固有频率的持续性的周期性功率扰动引起<sup>[1]</sup>。其波及的区域广,振荡从开始到消失历时长,容易对电力系统的安全和稳定造成危害。如何对其进行定位是一个重要的研究课题。

目前国内外有许多文献对风机接入电网的影响做了研究。风机的输出功率波动主要受到风速变化的影响,常用的风速模型有 Weibull 分布模型、混合风速模型以及风轮等效风速模型,其中用风轮等效风速模型获得的风速与自然界的功率密度相同,对研究风电并网运行产生的影响具有良好的适用性<sup>[2]</sup>。风机输出功率波动还受到塔架和风速空间分布特性等因素的影响<sup>[3-4]</sup>,当风电功率波动的频带覆盖了系统中某些较弱的阻尼模式的频带的频率时,就有可能引发强迫振荡<sup>[5]</sup>。

能量函数法是一种较为成熟的扰动源定位方法,根据扰动源所处的区域与其他区域能量特征的差异来对强迫振荡扰动源进行识别<sup>[6-8]</sup>。文献[7]借鉴了暂态能量建立的方法,提出利用能量转换特性识别强迫振荡扰动源位置的基本原理。文献[9]提出了基于参数辨识的扰动源定位方法,根据网络中消耗能量的非周期分量进行定位。文献[10]将有功功率波动及电压频率波动用相量表示,提出了根据波动相位实现扰动源定位的方法。但是在实际系统中,负荷的波动、系统中的随机噪声也会对定位精度产生影响<sup>[11-12]</sup>。

本文在能量函数法基础上提出一种对风电功率波动引发的强迫振荡扰动源定位方法。对风电功率扰动引发强迫振荡时的振荡模式进行了理论分析,在此基础上研究其引发的强迫振荡时系统的能量特征,并给出了利用某一具有代表性的波动分量对覆盖某一频带范围的强迫振荡扰动源进行定位的理论依据。提出对扰动源进行定位的方法:首先利用双谱分析识别强迫振荡中心频率,再利用小波变换提取振荡幅值最大的分量,根据该分量的能量转换特性识别扰动源所在位置。

## 1 风电功率波动的特点

由于风机运行在恒转矩控制模式或最大功率跟踪模式时,对风速中低频分量滤波效果不明显<sup>[13]</sup>,因此本文直接采用风速的频谱代替风机输出功率的频谱密度进行分析,可表示为<sup>[14]</sup>:

$$S(\omega) = \frac{4I^2 V_0 L}{(1 + 3\omega L / 2\pi V_0)^{5/3}} \quad (1)$$

式中: $\omega$ 为角频率; $I$ 为湍流强度; $L$ 为尺度参数,与风轮机高度有关; $V_0$ 为平均风速。

低频振荡的模态范围通常为 0.1~2.5 Hz,当扰动中包含的频率分量与系统中阻尼较弱的模态接近时,可能引发大幅的强迫振荡<sup>[5]</sup>。若取  $L=600$ ,根据文献[14]计算湍流强度值,可得不同条件下在低频振荡频带范围内的功率波动分量占风机总输出功率的比值  $\eta$ ,见表 1。可见风机功率波动在低频振荡发生的频率范围内具有较大的分量,当系统中风电渗透率较大时有可能引发大幅度强迫振荡。

## 2 风电功率波动引发强迫振荡的特征

### 2.1 风电功率波动引发强迫振荡的频域特性

对单机无穷大系统下的强迫功率振荡进行分

收稿日期:2018-04-26;修回日期:2018-06-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577032)

表1 不同风速和湍流条件下风机输出功率的波动情况

Tab.1 Wind power fluctuations under different wind speeds and turbulence conditions

$V_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	湍流强度 $I$	$\eta / \%$
3	0.25	3.6
5	0.13	5.1
10	0.06	7.9
12	0.05	8.9

析,发电机采用二阶经典模型,线性化的转子运动方程为:

$$M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + D \frac{d \Delta \delta}{dt} + K \Delta \delta = \Delta P \quad (2)$$

式中: $M$ 为发电机惯性时间常数; $D$ 为发电机阻尼系数; $K$ 为发电机同步转矩系数; $\delta$ 为发电机的功角; $\Delta P$ 为外界的功率扰动。若 $\Delta P$ 为风机的功率波动,由式(1)可知其时域函数可表示为:

$$\Delta P = \int_{\omega_1}^{\omega_2} S(\omega) \cos(\omega t) d\omega \quad (3)$$

式中: $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 表征功率波动 $\Delta P$ 的频带范围; $S(\omega)$ 为功率波动的频谱密度。

将式(3)代入式(2),可以求得转子角增量 $\Delta\delta$ 的变化情况:

$$\begin{cases} \Delta \delta = \int_{\omega_1}^{\omega_2} a(\omega) \sin[\omega t - \varphi(\omega)] d\omega \\ a(\omega) = \frac{S(\omega)/K}{\sqrt{(1-\nu^2)^2 + (2\zeta\nu)^2}} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)代表了扰动源为风电场功率波动时系统的响应情况,其中 $\varphi$ 代表振荡的相位; $\nu$ 为频率比; $\zeta$ 为阻尼比; $a(\omega)$ 代表了系统受到随机扰动时响应的频域特性。若 $S(\omega)$ 在系统固有频率附近的分量具有较高的频谱密度,由于该频率附近有 $\nu \approx 1$ ,系统的响应幅值 $a(\omega)$ 也会较大。即风电功率波动在系统固有频率附近具有较大分量时,系统中就有可能产生大幅度的强迫振荡。

## 2.2 风电功率波动引发强迫振荡的能量特性

系统中节点 $i$ 相对于节点 $j$ 的势能可表示为<sup>[7]</sup>:

$$V_{ij} = \int \Delta P_{ij} \Delta \omega_i \omega_0 dt \quad (5)$$

式中: $\Delta P_{ij}$ 为节点 $i$ 流向节点 $j$ 的功率变化; $\Delta \omega_i$ 为节点 $i$ 侧角频率的变化。对式(5)求导可以得到势能的瞬时变化率为:

$$v_{ij} = \Delta P_{ij} \Delta \omega_i \omega_0 \quad (6)$$

$v_{ij}$ 为节点 $i$ 向节点 $j$ 传输振荡能量的功率。设支路 $L_{ij}$ 功率波动 $\Delta P_{ij} = \Delta P_m \cos(\omega t + \varphi_1)$ ,节点 $i$ 的频率波动 $\Delta \omega_i = \Delta \omega_m \cos(\omega t + \varphi_2)$ ,代入式(6)可得:

$$v_{ij} = \frac{1}{2} \Delta P_m \Delta \omega_m [\cos(2\omega t + \varphi_1 + \varphi_2) + \cos(\varphi_1 - \varphi_2)] \quad (7)$$

式(7)由一波动项和一常数项组成,由暂态能量的性质可知,波动项维持强迫振荡的发生,而常数项决定了节点 $i$ 向节点 $j$ 传输振荡能量的大小。

当风电功率波动引发强迫振荡时,扰动源存在多个频率,角频率变化量和支路中有功功率变化量可表示为:

$$\begin{cases} \Delta P_{ij} = \sum_{k_1=1}^n \Delta P_{k_1} \cos(\omega_{k_1} t + \varphi_{k_1}) \\ \Delta \omega_i = \sum_{k_2=1}^n \Delta \omega_{k_2} \cos(\omega_{k_2} t + \psi_{k_2}) \end{cases} \quad (8)$$

代入式(6)可得:

$$v_{ij} = \sum_{k_1=k_2=k=1}^n \frac{1}{2} \Delta P_k \Delta \omega_k [\cos(2\omega_k t + \varphi_k + \psi_k) + \cos(\varphi_k - \psi_k)] + \sum_{\substack{k_1=1, k_2=1 \\ k_1 \neq k_2}}^n \frac{1}{2} \Delta P_{k_1} \Delta \omega_{k_2} \{ \cos[(\omega_{k_1} + \omega_{k_2})t + \varphi_{k_1} + \psi_{k_2}] + \cos[(\omega_{k_1} - \omega_{k_2})t + \varphi_{k_1} - \psi_{k_2}] \} \quad (9)$$

式中, $\Delta P_{ij}$ 和 $\Delta \omega_i$ 不同频率的波动分量仅会影响节点间的势能交换,只有相同频率的分量才会影响常数项的大小。即只有当 $\Delta P_{ij}$ 和 $\Delta \omega_i$ 的波动分量频率相同时,才会影响扰动源向系统传输的振荡能量。

## 3 风电引发的强迫振荡扰动源的定位

### 3.1 扰动源定位的思路

由式(9)可知,风机功率波动引发的强迫振荡由多个频率组成,但各个频率之间的相互作用不会对传输的振荡能量的大小造成影响,因此可以将不同频率的振荡分量分开考虑。当风机功率波动引发强迫振荡时,系统中各个频率的振荡能量均由该扰动源提供,因此可以选取其中幅值较大的单一频率分量对扰动源进行定位。

由此可得扰动源定位的思路:首先通过双谱分析分离强迫振荡信号和系统中其他随机噪声信号的频谱,并得出强迫振荡的中心频率。再利用小波变换获得振荡中心频率的相位信息,根据所获得相位信息计算系统暂态能量的流向,判断强迫振荡扰动源是否位于风电场中。

### 3.2 基于双谱和小波变换的扰动源定位

双谱的表达式为<sup>[15]</sup>:

$$B_x(\omega_1, \omega_2) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau_2=-\infty}^{\infty} c_{3x}(\tau_1, \tau_2) e^{-j(\tau_1 \omega_1 + \tau_2 \omega_2)} \quad (10)$$

双谱由信号的三阶累积量定义,其中  $c_{3x}(\tau_1, \tau_2)$  为信号的三阶累积量。本文利用双谱对角切片的方法对振荡的中心频率进行判别,该方法保留了多数的信号特征和抑制高斯噪声的能力,同时具有直观、易于计算的优点。

令  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ , 则双谱的对角切片定义为:

$$B_{x,D}(\omega) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau_2=-\infty}^{\infty} c_{3x}(\tau_1, \tau_2) e^{-j(\tau_1+\tau_2)\omega} \quad (11)$$

由于噪声信号的双谱几乎为零,而强迫振荡的功率波动具有非线性特征,因此可以利用双谱将其与噪声信号分离开,提取出振荡中心频率。

对任意信号  $f(x)$ , 其小波变换定义为<sup>[16]</sup>:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (12)$$

式中:  $a$  为尺度参数;  $b$  为平移因子;  $\psi(t)$  代表分析采用的基小波,  $*$  表示复共轭。

选用 Morlet 小波作为分析的基小波:

$$\psi(t) = 1/\sqrt{\pi f_b} e^{-t^2/2f_b} e^{j\omega_w t} \quad (13)$$

其中  $\omega_w$  为小波的中心频率,对式进行小波变换可得:

$$W(a, b) = \sqrt{a} \int_{\omega_1}^{\omega_2} S(\omega) e^{-\frac{f_b}{2\pi}(a\omega - \omega_w)^2} e^{j\omega b} d\omega \quad (14)$$

设振荡的中心频率为  $\omega_0$ , 选取小波参数,使得  $a\omega_0 - \omega_w = 0$ , 则远离振荡中心频率的其他分量的小波系数由于  $e^{-\frac{f_b}{2\pi}(a\omega - \omega_w)^2}$  项衰减为 0, 进而提取出振荡中心频率附近的幅值和相位信息。

### 3.3 扰动源定位流程

根据以上分析,扰动源定位方法的具体步骤为:

- (1) 获取发生强迫振荡区域的功率振荡信号;
- (2) 信号预处理,截取稳定时的振荡信号;
- (3) 利用双谱分析获取强迫振荡的中心频率  $f_0$ ;
- (4) 利用小波变换获取振荡信号中频率为  $f_0$  的分量的相位信息;
- (5) 根据相位信息,计算系统的能量函数流向,判断强迫振荡扰动源所在位置。

扰动源定位的流程如图 1 所示。

## 4 算例分析

### 4.1 4机2区系统

在 4 机 2 区系统的母线 10 接入风电场进行仿真分析,结构见图 2。4 台同步发电机的容量为 900 MV·A, 风电场的容量为 300 MV·A, 该系统包含一频率为 0.59 Hz 的区域间振荡模式。取平均风速 10 m/s, 接入风轮等效风速模型<sup>[17-19]</sup>进行仿真。

风电场输出功率曲线如图 3 所示,由于风速的变化,输出功率存在大幅波动。

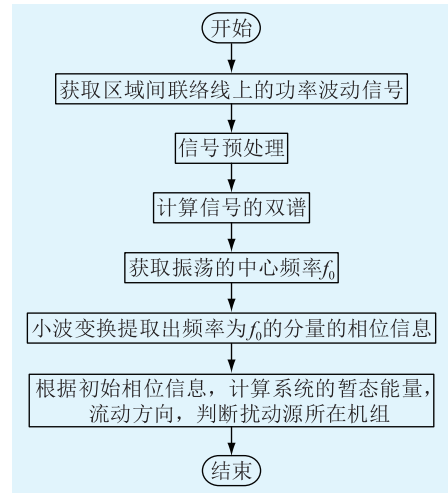


图 1 强迫振荡扰动源定位流程

Fig.1 Flowchart of disturbance source locating

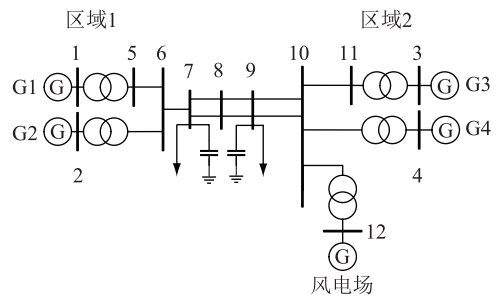


图 2 接入风电场后的 4 机 2 区系统接线

Fig.2 Four-generator two-area system with windfarm

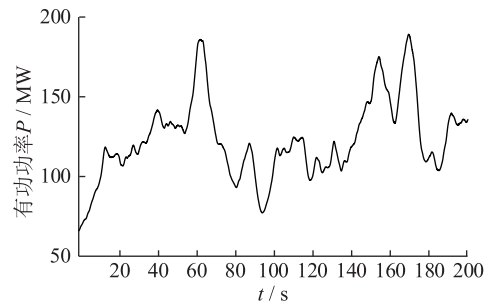


图 3 风电场输出有功功率波形

Fig.3 Active power output of windfarm

风电场输出功率和联络线的功率波动的频谱如图 4 所示。在系统固有频率附近,联络线上的功率波动分量明显大于风电场输出功率波动分量,由此可知系统在固有频率附近发生了强迫振荡。

进一步对联络线的功率波动进行双谱分析,结果如图 5 所示,可见联络线上功率波动在系统固有频率附近有一个峰值。对图 5 中的波形进行分析可以得出,系统强迫振荡的中心频率  $f_0 = 0.56$  Hz。

使用小波分析提取出振荡中心频率  $f_0$  处分量的相位信息,即可对扰动源进行定位。图 6 为联络线上的功率波动以及小波分析提取的结果,据此可求

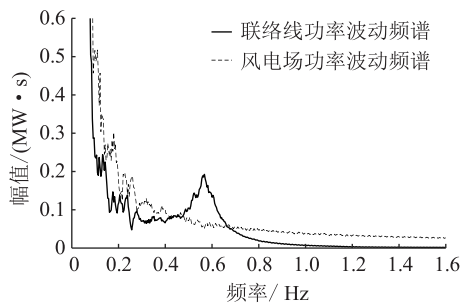


图4 风电场与区域间联络线有功功率波动的频谱

Fig.4 Spectrum of active power inwind farm and tie-line

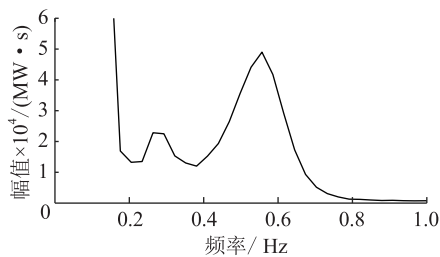


图5 联络线功率波动的双谱对角切片

Fig.5 Bispectral diagonal slice of power fluctuation

得联络线上有功功率波动的初始相位。

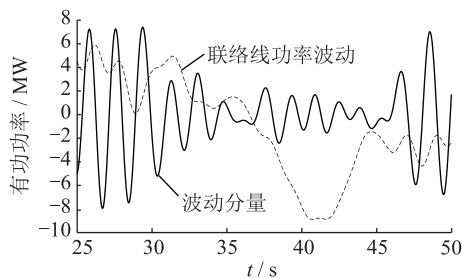


图6 联络线有功功率波动与小波分析提取的波动分量

Fig.6 Fluctuation of active power in tie-line and the fluctuation component of  $f_0$ 

同理,对其他线路的功率波动及各节点的频率波动进行小波分析,结果如表2所示。

表2 振荡稳定时各联络线振荡能量流向

Tab.2 Oscillation energy flow of each line on steady-state

线路	$\varphi_1/(\circ)$	$\varphi_2/(\circ)$	$\cos(\varphi_1-\varphi_2)$	能量流向
1—6	27.78	-36.4	0.44	6→1
2—6	10.4	-36.4	0.69	6→2
3—6	133.8	128.1	0.99	10→3
4—6	130.3	139.2	0.98	10→4
10—6	27.8	128.1	-0.18	10→6
13—10	167.0	40.2	-0.60	13→10

根据能量判据的结果,联络线上的势能由节点10流向节点6,表明扰动源在区域2,发电机G1,G2,G3,G4的势能均由电网侧流入发电机,只有风

电场节点的势能由发电机流向电网,因此可以判断出扰动源为风电场的功率波动。与实际情况相符。

#### 4.2 10机39节点系统

10机39节点系统结构见图7,在母线6接入容量为300 MV·A的风电场,取平均风速10 m/s进行仿真。

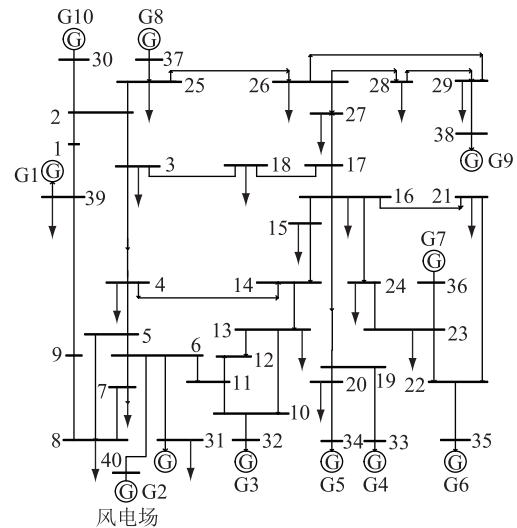


图7 接入风电场后的10机39节点系统结构

Fig.7 10-generator 39-node system with wind farm

模态分析的结果表明该系统中存在一频率为0.98 Hz的区域间振荡模式,参与的机组为G2,G3和G4,G5,G6。对支路15—16和支路16—24的功率波动进行双谱分析的结果表明其中存在一中心频率为0.97 Hz的宽频带强迫振荡分量。由第2章的分析可知该振荡由风电场功率波动引发,为了验证所提出的方法能否正确定位扰动源的位置,取风电场附近支路进行小波分析,所得结果如表3所示。

表3 振荡稳定时风电场附近的振荡能量流向

Tab.3 Oscillation energy flow near wind farm on steady-state

线路	$\varphi_1/(\circ)$	$\varphi_2/(\circ)$	$\cos(\varphi_1-\varphi_2)$	能量流向
6—5	117.24	128.04	0.98	6→5
6—7	69.84	128.04	0.53	6→7
6—11	209.52	128.04	0.15	6→11
6—31	111.64	128.04	0.96	6→31
6—40	273.54	128.04	-0.82	40→6

根据表3,振荡能量由风电场所在的节点40流向节点6,再由节点6流向网络中其他部分,与实际情况符合。

#### 5 结语

本文对风电功率波动引发的强迫振荡的特征进行了分析,论证了由此引发的强迫振荡与单一频

率扰动源引发的强迫振荡相比具有宽频带的特性,研究了其能量函数与传统强迫振荡能量函数的不同特点,并根据能量函数的特征提出了对风机功率波动引发的强迫振荡扰动源进行定位的方法。该定位方法利用双谱分析获得振荡的中心频率,再通过小波变换获得能够代表强迫振荡特征的频率分量的相位信息,从而获得系统的势能流向,据此对强迫振荡扰动源进行定位。通过在4机2区系统和10机39节点系统中接入风电场进行仿真,验证了提出的定位方法的有效性。

#### 参考文献:

- [1] 汤涌. 电力系统强迫功率振荡的基础理论[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 29-33.  
TANG Yong. Fundamental theory of forced power oscillation in power system[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 29-33.
- [2] 张建忠,程明. 风力发电随机风速时间序列生成方法分析与评价[J]. 风能, 2012, (1): 58-61.  
ZHANG Jianzhong, CHENG Ming. Analysis and evaluation on generating method of stochastic wind speed time series [J]. Wind Energy, 2012, (1): 58-61.
- [3] SU C, HU W, CHEN Z, et al. Mitigation of power system oscillation caused by wind power fluctuation [J]. IET Renewable Power Generation, 2013, 7(6): 639 - 651.
- [4] BROWNLESS S, FLYNN D, FOX B, et al. The impact of wind farm power oscillations on the Irish power system [C] // IEEE Lausanne Power Tech. Lausanne, Switzerland: IEEE, 2007: 195-200.
- [5] 鞠平,刘咏飞,王红印,等. 电力系统的广义强迫振荡[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 1-6.  
JU Ping, LIU Yongfei, WANG Hongyin, et al. General forced oscillations of power systems [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 1-6.
- [6] 余一平,闵勇,陈磊. 多机电力系统强迫功率振荡稳态响应特性分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(22): 5-9.  
YU Yiping, MIN Yong, CHEN Lei. Analysis of forced power oscillation steady-state response properties in multi-machine power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 5-9.
- [7] 余一平,闵勇,陈磊,等. 基于能量函数的强迫功率振荡扰动源定位[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 1-6.  
YU Yiping, MIN Yong, CHEN Lei, et al. Disturbance source location of forced power oscillation using energy functions [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 1-6.
- [8] 王娜娜,廖清芬,唐飞,等. 基于割集能量及灵敏度的强迫功率振荡扰动源识别[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 75-80.  
WANG Nana, LIAO Qingfen, TANG Fei, et al. Disturbance source identification based on cutset energy and sensitivity for forced power oscillation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 75-80.
- [9] 杨东俊,丁坚勇,李继升,等. 基于参数辨识的强迫功率振荡扰动源定位方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 26-30.  
YANG Dongjun, DING Jianyong, LI Jisheng, et al. A disturbance source location method for forced power oscillation based on parameter identification [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 26-30.
- [10] 蒋平,郑斌青,冯双. 基于功率及频率波动相位的强迫振荡扰动源定位[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 112-117.  
JIANG Ping, ZHENG Binqing, FENG Shuang. Forced disturbance-source locating based on phase-angle between power and frequency fluctuations [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 112-117.
- [11] 关欣,南海鹏,余向阳,等. 负荷波动对强迫振荡扰动源定位的影响[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(2): 8-13.  
GUAN Xin, NAN Haipeng, YU Xiangyang, et al. Influence of load fluctuation to forced oscillation disturbance source location [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(2): 8-13.
- [12] 蔡国伟,王丽馨,杨德友. 类噪声环境下基于滑动相干谱的强迫振荡检测方法研究[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(1): 59-65.  
CAI Guowei, WANG Lixing, YANG Deyou. Research on detection method of forced oscillation based on sliding coherent spectrum in noise-like environment [J]. Electrician New Technology, 2017, 36(1): 59-65.
- [13] LUOC, FAR H G, BANAKAR H, et al. Estimation of wind penetration as limited by frequency deviation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(3): 783-791.
- [14] 马晓慧. 风速模型对风电机组功率曲线的影响研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2016.  
MA Xiaohui. Research on wind speed model and its influence on power curve [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [15] 李勋,龚庆武,乔卉,等. 低频振荡模式非线性相关作用的高阶谱非参数直接分析法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 61-68, 18.  
LI Xun, GONG Qingwu, QIAO Hui, et al. Non-parametric high-order spectral analysis method for nonlinear correlation of low-frequency oscillation modes [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 61-68, 18.
- [16] 栾某德,刘涤尘,廖清芬,等. 基于改进小波系数奇异值分解和小波去噪的低频振荡时变模式辨识[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 141-147.  
LUAN Moude, LIU Dichen, LIAO Qingfen, et al. A method to identify time-varying mode of low frequency oscillation by continuous wavelet transform based on raising singular value decomposition of wavelet coefficient and wavelet denoising [J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 141-147.
- [17] SORENSEN P, HANSEN A D, ROSAS P A C. Wind models for simulation of power fluctuations from wind farms [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002,

90(12):1381-1402.

- [18] 潘险险,赵双,周正. PSS/E与PowerWorld风电机组模型对比[J]. 广东电力,2018,31(2):45-50.  
PAN Xianxian, ZHAO Shuang, ZHOU Zheng. Comparison of wind power generator models in PSS/E and PowerWorld[J]. Guangdong Electric Power,2018,31(2):45-50.
- [19] 杨家然,王兴成,隋林涛,等. 基于风险的风电并网可容许性评估[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):60-65.  
YANG Jiaran, WANG Xingcheng, SUI Lintao, et al. Risk based admissibility evaluation of wind power integration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017,37(8):60-65.

作者简介:



蒋平

蒋平(1954—),男,博士,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统运行控制和电力电子在电力系统中的应用(E-mail:jping@seu.edu.cn);

史豪(1995—),男,硕士研究生,从事电力系统稳定运行与控制的研究工作(E-mail:xbzxsh@yeah.net);

吴熙(1987—),男,博士,副教授,研究方向为电力系统运行控制。

## Localizing Disturbance Source of Power System Forced Oscillation Caused by Wind Power Fluctuation

JIANG Ping, SHI Hao, WU Xi

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Forced power oscillations in the power system are likely to trigger a wide range of power fluctuations. When new energy such as wind power is connected to the power grid, the fluctuation of output power is random. When the power fluctuation causes the forced oscillation in the system, the oscillation will also show random characteristics and it is difficult to locate the disturbance source. Therefore, a method of locating forced oscillation disturbance source caused by wind farm is proposed. The method uses the oscillation bispectrum to obtain the center frequency and obtains the initial phase at the oscillation center frequency by wavelet transform. According to this, the disturbance source can be located by the energy function. The actual example verifies the feasibility and effectiveness of the proposed method.

**Key words:** forced power oscillation; disturbing source location; wind power; bispectral analysis; wavelet

(编辑 钱悦)