

# 基于粒子群算法的变换器并网系统振荡初期交流信号幅频调制特征解调方法

蔡百科, 王思成, 袁小明  
(华中科技大学电气与电子工程学院, 武汉 430074)

**摘要:** 针对新能源并网比例不断提升导致的电力系统振荡问题, 提出了一种基于粒子群算法的电力系统振荡信号幅频调制特征解调方法。首先, 从交流电气量形成与演化的物理机制出发, 明确了振荡信号在扰动下的约束关系, 揭示了其幅值与频率随时间演化的调制规律。与传统基于傅里叶分解或小波分析的谐波叠加方法不同, 振荡信号并非由静态谐波叠加而成, 而是受系统动态闭环作用形成的连续调制过程, 更具物理意义。在此基础上, 设计了基于粒子群算法的幅频调制特征提取方法。以拟合波形与实际波形偏差为目标, 提取决定振荡过程的幅频调制参数。仿真结果表明, 该方法能够准确反映典型的变换器并网系统的振荡规律, 拟合波形与原始信号高度一致, 动模实验进一步验证了算法在实际系统中的适用性与有效性。

**关键词:** 振荡过程; 幅频调制机制; 粒子群算法; 幅频调制特征

## Demodulation Method for Amplitude-Frequency Modulation Characteristics of AC Signals in Initial Stage of Converter Interfaced System Oscillation Based on Particle Swarm Optimization Algorithm

CAI Baike, WANG Sicheng, YUAN Xiaoming

(School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** A particle swarm optimization algorithm based demodulation method for amplitude frequency modulation characteristics of power system oscillation signals is proposed to address the problem of power system oscillation caused by the continuous increase in the proportion of new energy grid connected. Firstly, starting from the physical mechanisms of formation and evolution of AC electrical quantities, the constraint relationships of oscillation signals under disturbances are clarified, revealing the modulation patterns of their amplitudes and frequencies over time. Unlike traditional harmonic superposition methods based on Fourier decomposition or wavelet analysis, this study emphasizes that oscillation signals are not formed by static harmonic superposition but rather result from a continuous modulation process shaped by the system's dynamic closed-loop action, which carries greater physical significance. On this basis, a PSO-based amplitude-frequency modulation feature extraction method is designed. By minimizing the deviation between the fitted waveform and the actual waveform, the amplitude-frequency modulation parameters that determine the oscillation process are extracted. Simulation results show that the proposed method can accurately reflect the oscillation patterns of typical converter-interfaced power systems, with the fitted waveforms highly consistent with the original signals. Dynamic model experiments further validate the applicability and effectiveness of the proposed algorithm in practical systems.

**Key words:** oscillation process; amplitude-frequency modulation mechanism; particle swarm optimization algorithm; amplitude-frequency modulation characteristics

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U23B600008); 台达电力电子科教发展计划资助项目(DREN2024001)。

**Foundation item:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (U23B600008); the Delta Power Electronics Science and Education Development Program of Delta Group (DREN2024001).

## 0 引言

随着风力、光伏等新能源发电在电力系统中比例越来越高,新型电力系统的振荡事故愈发复杂,严重影响着电力系统的安全稳定运行<sup>[1]</sup>。正确认识电力系统振荡产生和发展过程是解决系统振荡问题的前提,在认识电力系统振荡机理的基础上,分析电力系统振荡信号的特征可以确定系统的振荡幅值、频率,在系统振荡实测数据分析、暂态仿真数据估计以及稳定控制装置的设计等具有良好的应用场景<sup>[2]</sup>。

文献[3-5]指出,交流电力系统的稳定要求设备和网络共同维持系统的电压幅值/频率稳定,并向用户提供所需的有功/无功功率。当稳态运行系统受扰后,相关设备通过控制结构调整设备内电势幅值/频率,各个端口变化的内电势幅值/频率共同作用于网络,驱动网络产生变化的有功/无功功率,变化的有功/无功功率再次作用于设备,驱动设备端口处内电势幅值/频率发生改变。在闭环系统的作用下,反复迭代演化,设备端口处形成不断随时间变化的内电势幅值/频率,旋转矢量在三相静止坐标系上的投影形成随时间不断变化的三相交流瞬时值。系统设备与网络之间的相互作用形成了电力系统振荡信号的调制过程。

当前针对电力系统振荡信号分析方法主要分两类,第一类以傅里叶谐波为代表的级数叠加思想,其中经典的方法有傅里叶分析、prony算法。文献[6-8]认为振荡信号由多个不同频率的谐波叠加而成,可通过分析不同谐波的幅值/频率得到振荡信号的特征。傅里叶分析的基本思想是将交变信号投影至一组固定频率正弦基函数,投影所得到的幅值认为是该固定频率下对应的谐波幅值,谐波幅值无法反映在实际系统中交变信号幅值具体是如何变化的,缺少交变信号物理特性的含义。文献[9-11]提出prony算法,认为连续信号可由多个复指数函数叠加而成,指数的幅值、频率和相位反映了连续信号的特征,与傅里叶分析方法类似,将电力系统扰动后的测量信号视为若干个指数衰减(或增长)的正弦振荡模态的叠加,并通过参数辨识的方法直接估计各振荡模态的频率、阻尼和幅值。该方法仍然没有从信号自身的形成过程出发,分析信号振荡发展,与傅里叶分析思想

一致。文献[12-13]对谐波信号进行经验模态分解,通过Hilbert变换得到各次谐波的幅值、频率和相位。文献[14]认为可以通过神经网络算法对基波幅值、频率以及相位进行分析,但神经网络的分析方法仍然没有离开傅里叶分解谐波的概念。第二类以傅里叶分解为代表的幅频分析方法,目标为了得到振荡频率随时间的变化情况。文献[15-18]认为传统傅里叶分析在分析时变幅频信号时存在不足,提出了短时傅里叶变换和小波变化,将振荡信号分成多个窗口,针对不同的窗口进行分析,从而得到不同窗口幅值/频率的变化情况,无论是短时傅里叶变换和小波变化都试图想得到振荡信号随时间的变化情况,将前后存在因果关系发展的振荡波形划分成若干个孤立窗口分别分析,用“平均频率”来代表窗口的实际频率,该方法忽略了每个窗口的频率是时变的。文献[19]基于轨迹线性化方法,沿着系统变量运行轨迹对系统进行分段线性化处理,从而得到以各段轨迹为平衡点的系统线性化后模型,以求取各时间断面的特征根,进而通过轨迹断面构成的特征根随时间演化的序列,得到系统基于分段线性化的振荡特征演化过程。对系统变量运行轨迹分段线性化的过程没有考虑变量前后因果发展过程,即振荡信号的幅值频率是在系统基本物理结构约束下随时间不断变化的,同样是用孤立的视角去分析问题,最后所得到的轨迹特征根其物理内涵并不明确,并不能很好解释系统振荡时电气量振荡形成和演化的物理过程。

现有方法(如傅里叶分析、Prony算法等)大多基于谐波叠加或指数分解思想,将振荡信号视为若干固定频率分量的组合,并通过频谱或模态参数对信号进行分析。这类方法在本质上属于对信号的事后分解,其得到的幅值和频率主要是对波形的数学描述,难以反映实际系统中电气量幅值与频率随时间连续变化的过程<sup>[20-23]</sup>。短时傅里叶变换、小波变换等方法虽然能够在一定程度上反映信号的时变特性,但通常通过分段或窗口化处理得到的“平均频率”割裂了振荡过程的连续演化关系,仍难以刻画振荡信号在系统动态闭环作用下的真实发展过程。传统方法在描述电力系统振荡信号幅值与频率随时间连续演化的物理过程方面存在不足。

综上所述, 本文从电力系统交流电气量的形成演化机制出发, 明确信号在振荡发生时所处的原始约束关系, 从而分析出信号在系统发生振荡后随时间不断发展变化的调制机制; 基于此, 通过优化算法设计, 提取振荡信号瞬时值波形随时间变化的振荡特征; 最后, 结合仿真和实验得到的振荡波形, 验证上述调制规律的正确性。

## 1 电力系统振荡信号幅频调制机制

### 1.1 电力系统交变信号形成过程

为了避免复杂的电路结构及控制策略在理解和分析设备上的困难, 本文以电压源型变换器并网系统为例, 作了如图1所示的简化。因为内电势直接由电流PI控制和锁相控制建立, 为简化分析, 忽略电压外环控制对内电势建立的影响, 仅考虑电流内环控制环节, 同时不考虑端电压前馈和电流交叉解耦等附加项的影响。

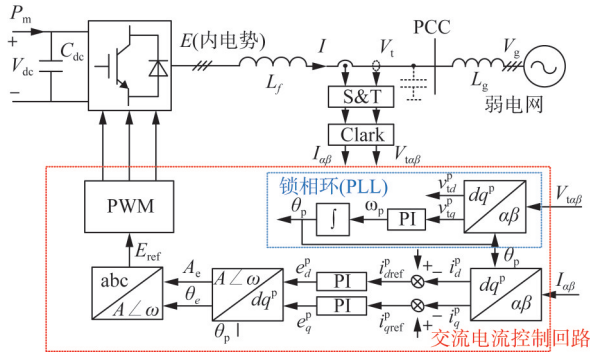


图1 电压源型逆变器系统简化结构示意图

Fig. 1 Simplified schematic diagram of a voltage-source inverter system

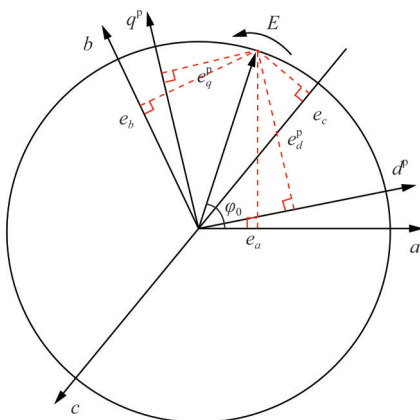


图2 内电势旋转矢量形成过程

Fig. 2 Formation process of the internal voltage rotating vector

设备通过控制回路建立内电势, 从而实现系统有功/无功功率的传输。图1中, 控制回路通过检测端电压 $V$ 经锁相环形成锁相频率 $\omega_p$ , 锁相频率 $\omega_p$ 与线路电流 $I$ 经PI控制形成锁相坐标系 $dp^p$ 下的 $dq$ 内电势 $e_d^p(t)$ 和 $e_q^p(t)$ , 最终共同决定内电势幅值和频率, 他们之间满足如图2中的三角约束, 其中内电势幅值由 $e_d^p(t)$ 和 $e_q^p(t)$ 所构成的两条直角边所决定, 内电势频率由锁相频率和 $dq$ 内电势动态决定。

$$\begin{cases} A(t) = \sqrt{e_d^p(t)^2 + e_q^p(t)^2} \\ \omega(t) = \omega_p(t) + \left[ \arctan\left(\frac{e_d^p(t)}{e_q^p(t)}\right) \right]' \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $A(t)$ 为内电势时变幅值;  $\omega(t)$ 为内电势时变角速度。

内电势幅值/频率形成内电势旋转矢量, 旋转矢量的长度由内电势幅值决定, 旋转矢量的角速度由内电势频率决定。内电势旋转矢量通过振荡器在三相坐标系上的投影形成三相交流瞬时值, 如图2所示, 若不考虑PWM及开关过程, 振荡器产生的内电势指令 $E_{ref}$ 可直接视作变换器端口输出的实际内电势 $E$ , 如式(2)所示。

$$\begin{cases} E = A(t)e^{j\left(\int \omega(t)dt + \varphi_0\right)} \\ e_a = A(t)\cos\left(\int \omega(t)dt + \varphi_0\right) \\ e_b = A(t)\cos\left(\int \omega(t)dt + \varphi_0 - \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_c = A(t)\cos\left(\int \omega(t)dt + \varphi_0 + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\varphi_0$ 为内电势初始相位;  $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$ 分别为abc三相交流瞬时值。

设备端口幅值/频率时变的内电势 $E$ 与常数幅值/频率理想电压源 $V_g$ 经串联电感 $L_{eq}$ 产生线路电流。

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{L_{eq}} \int (E - V_g) dt \\ &= \frac{1}{L_{eq}} \int (A(t)e^{j\left(\int \omega(t)dt + \varphi_0\right)} - A_g e^{j\theta_g}) dt \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $L_{eq}$ 为线路总电感; 理想电压源 $V_g = A_g e^{j\theta_g}$ 。

由此可见, 三相交流瞬时值由内电势旋转矢量在三相静止坐标系上的投影所决定, 而内电势旋转矢量由内电势幅值/频率两个维度所描述。当内电势幅值/频率发生扰动时, 决定了内电势旋转矢量

幅值和角速度的变化情况,最终经过在三相静止坐标系上的投影体现在瞬时值,所以系统应以内电势幅值/频率作为状态分析。

### 1.2 变换器并网系统闭环动态过程

电力系统本质上是以设备根据并网端口的有功/无功电流调节内电势幅值/频率而网络根据设备产生的内电势幅值/频率调节其端口有功/无功电流的闭环机制运行。

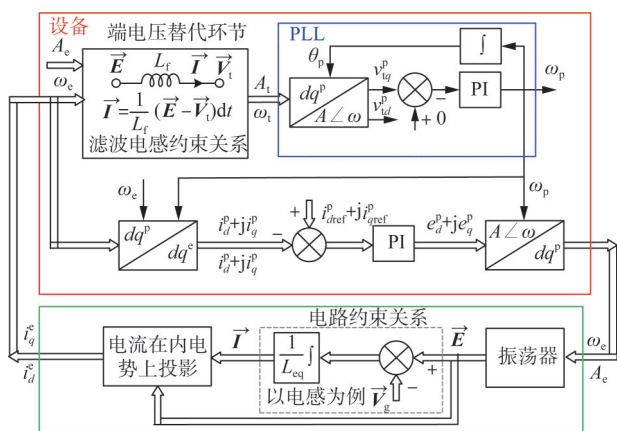


图3 系统动态闭环运行过程

Fig. 3 Dynamic closed-loop operation process of the power system

如图3所示,当网络受到扰动后,为了保证系统的稳定运行,设备根据端口变化的有功/无功电流或者功率调节自身输出的内电势幅值和频率,并且设备输出的内电势幅值和频率完全取决于设备端口的有功/无功电流或者功率。相应的网络感受到端口的内电势幅值和频率发生变化,进一步调节各设备并网端口分配的有功/无功电流或者功率。如此往复,系统各电气量在网络设备结构的约束下不断迭代更新,最终各扰动形成闭环自治,以各自的形态随着时间不断演化发展。整个交变电力系统设备内电势幅值/频率和网络有功/无功电流间的闭环运行机制即反映了由设备和网络构成的系统运行背后有功/无功电能流通的基本形式<sup>[24]</sup>。

### 1.3 振荡信号幅频调制过程

结合各电气量在系统网络设备结构约束下动态闭环过程,本节进一步分析在系统原始结构约束下,内电势幅值/频率增量的形态特征及后续演化发展过程。由文献[25]可知,在振荡初期,各电气量偏离其稳态工作点幅度较小,扰动在系统结构约束下的非线性作用较弱,可将各电气量在稳态工作

点上呈现出的弱非线性系统进行线性化,再利用线性系统数学工具可实现对线性化范围内各电气量演化规律的刻画,即电气量的幅值/频率由一组相同的特征根决定的复指数叠加组合。

对于一个稳态运行的系统其各个状态量之间存在如式(4)约束关系:

$$f(x^n, x^{n-1}, \dots, x) = 0 \quad (4)$$

式中:  $x$  为各设备端口内电势幅值/频率和网络端口电流幅值/频率的列向量;  $x^n$  为各状态量的  $n$  阶导数。

当各状态量因扰动偏离系统平衡点时,有:

$$x = x_0 + \Delta x \quad (5)$$

式中:  $x_0$  为各状态量的稳态工作点;  $\Delta x$  为各状态量偏离其稳态工作点的增量。

受扰后的状态方程为:

$$f((x_0 + \Delta x)^n, (x_0 + \Delta x)^{n-1}, \dots, x_0 + \Delta x) = 0 \quad (6)$$

在系统扰动初期,各状态量之间的非线性关系近似成线性系统,近似后得到状态量增量之间的数学关系如式(7)所示。

$$\Delta \dot{x} = H \Delta x \quad (7)$$

式中  $H$  为近似线性系统的状态矩阵。

根据线性系统理论知识可知状态方程的解为:

$$\Delta x = k_1 e^{\lambda_1 t} + k_2 e^{\lambda_2 t} + \dots + k_n e^{\lambda_n t} \quad (8)$$

式中:  $\lambda_i$  为系统状态方程的特征根对应了系统的第  $i$  个模态;  $k_i$  为第  $i$  个特征根对应的系数。

系统模态完全取决于微分方程组的特征多项式,微分方程组的特征多项式就是传递函数的分母多项式,也就是说系统模态完全取决于传递函数的分母多项式,而传递函数的极点仅可能是实数或者共轭复数的形式,因此系统模态仅可能以特征根为实数或者共轭复数所决定振荡形式演化。当  $\lambda_i$  为实数时,每个特征根决定了系统模态以指数增长或者衰减的模式演化,当  $\lambda_i$  为共轭复数时,每对特征根决定了系统模态以幅值指数增长或者衰减的正弦形式振荡演化,对应地两个幅值/频率相等旋转方向相反的旋转矢量虚部相互抵消,在实轴上的投影加和为实信号,如图4所示。本文着重考虑特征根为共轭复数的一般情况,特征根为实数可看作是共轭复数虚部为0的特殊情况。一般而言,特征根决定的系统状态量增量变化的规律可以描述为:

$$\begin{aligned}
\Delta x &= \sum_{i=1}^n (h_i e^{(\sigma_i + j\omega_i)t} + h_i e^{(\sigma_i - j\omega_i)t}) \\
&= \sum_{i=1}^n (h_i e^{\sigma_i t} \cos \omega_i t + j h_i e^{\sigma_i t} \sin \omega_i t + h_i e^{\sigma_i t} \cos \omega_i t - \\
&\quad j h_i e^{\sigma_i t} \sin \omega_i t) \\
&= \sum_{i=1}^n 2 h_i e^{\sigma_i t} \cos \omega_i t = \sum_{i=1}^n k_i e^{\sigma_i t} \cos (\omega_i t + \varphi_i)
\end{aligned} \quad (9)$$

式中:  $h_i$  为推到过程系数等于  $0.5 k_i$ , 特征根实部对应的  $k_i e^{\sigma_i t}$  为状态幅值/频率增量第  $i$  个模态的幅值, 特征根虚部对应的  $\omega_i$  为状态幅值/频率增量第  $i$  个模态的频率。

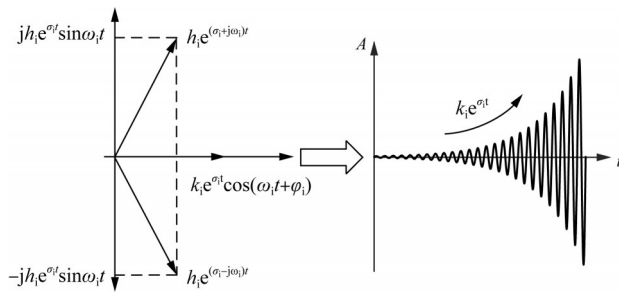


图4 特征根与振荡信号演化形态关系

Fig. 4 Relationship between eigenvalues and the evolution patterns of oscillation signals

因此, 系统扰动初期, 以内电势幅值/频率为状态, 其偏离稳态工作点的变化情况解析表达如式(10)~(12)所示。

$$e_a(t) = A(t) \cos \left( \int \omega(t) dt + \varphi_0 \right) \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
A(t) &= A_0 + \Delta A(t) \\
&= A_0 + \sum_{i=1}^n k_{Ai} e^{\int \alpha_i dt} \cos \left( \int \omega_i dt + \varphi_{Ai} \right) \quad (11)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\omega(t) &= \omega_0 + \Delta \omega(t) \\
&= \omega_0 + \sum_{i=1}^n k_{\omega i} e^{\int \alpha_i dt} \cos \left( \int \omega_i dt + \varphi_{\omega i} \right) \quad (12)
\end{aligned}$$

式中:  $e_a(t)$  为内电势三相交流瞬时值中的一相;  $\Delta A(t)$ 、 $\Delta \omega(t)$  分别为内电势幅值的增量和频率的增量;  $A_0$ 、 $\omega_0$  分别为内电势幅值/频率的稳态工作点, 其中下标  $i$  表示第  $i$  个模态;  $A/\omega$  为幅值/频率;  $\alpha/\omega$  分别为特征值的实部/虚部;  $k$  为对应系数; 符号  $\varphi$  表示相位。例如,  $k_{Ai}$  为第  $i$  个模态内电势幅值增量的幅值调制系数,  $k_{Ai} e^{\int \alpha_i dt}$  表示第  $i$  个模态内电势幅值增量的幅值是以指数增长或者衰减形式变化。内电势幅值/频率演化形态都是一组相同的特

征根决定的复指数叠加组合, 复指数前面的系数和指数里面初相位的不同才造成了系统中内电势幅值/频率等不同状态量演化形态的差异。

#### 1.4 仿真说明

为了进一步说明动态过程中交变电气量的演化情况及其调制机制, 本文在 MATLAB/Simulink 中搭建如图1所示变换器并网结构仿真模型。在仿真系统稳定运行后, 为了模型系统受扰过程, 在 0.2 s 时, 使系统锁相频率偏离其稳态值 0.05 rad/s, 系统开始发生自由振荡。内电势瞬时值波形、内电势幅值波形和内电势频率波形如图5所示, 图5中上图为变换器端口输出  $a$  相交流瞬时值波形。利用式(1)通过  $e_d^p$ 、 $e_q^p$ 、 $\omega_p$  计算出图5中的内电势的幅值/频率。

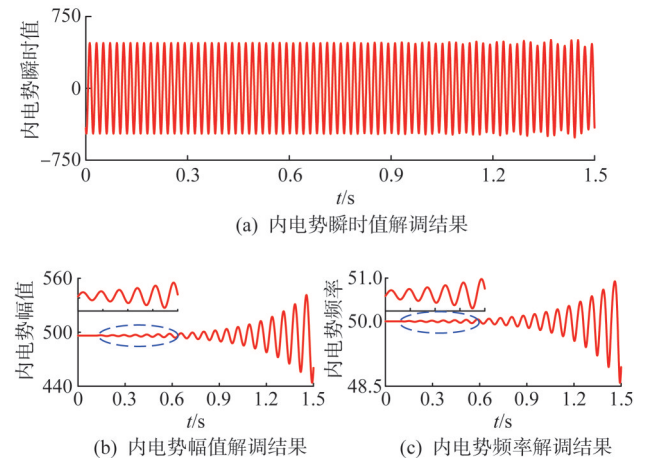


图5 变换器并网系统内电势振荡过程

Fig. 5 Oscillation process of internal voltage in the converter-interfaced power system

在系统扰动初期, 各个电气量幅值/频率偏离其稳态值较小, 电气量幅值/频率等直流状态之间存在可线性化的弱非线性关系, 因此在对非线性系统进行小扰动线性化时, 系统中各运动状态的动态演化行为在一定范围内应当呈现出或至少近似表现为能够用复指数函数及其线性组合描述的客观物理形态, 并且这一形态在该范围内能够满足系统动态的闭环自治。根据1.3节分析及图5(b)、(c)所示, 扰动初期交变信号演化过程与仿真结果相符。

## 2 基于粒子群算法的幅频调制信号的解调方法

基于振荡信号幅频调制演化机制, 提取振荡信

号波形中决定信号演化过程的关键性调制参数, 对分析信号振荡发展过程尤为重要。本文利用上文提到的连续幅频调制函数采用粒子群算法对实际振荡波形进行拟合分析, 从而验证振荡信号幅频调制演化机制的正确性。

### 2.1 目标函数

拟合效果的好坏主要取决于发生扰动后调制波形与实际振荡波形的近似程度, 当调制波形越接近于实际振荡波形, 同一时刻调制波形上的点偏离实际振荡波形也就越小, 因此本文采用两个波形上对应点的偏离程度作为目标函数, 来描述波形的拟合程度。

$$\max F = 1 - \sum_{i=1}^n \left| \frac{S_1(i) - S(i)}{S(i)} \right| \times 100\% \quad (13)$$

式中:  $F$  为波形的拟合程度;  $S_1(i)$  为瞬时值拟合波形上第  $i$  个采样点的大小;  $S(i)$  为实际振荡信号波形上第  $i$  个采样点的大小;  $n$  为波形上采样点数量。

### 2.2 幅频调制信号解调方法

粒子群算法是受鸟群觅食行为启发的一种智能优化算法, 通过产生随机鸟群进行觅食, 选择其中个体适应度极大值和群体适应度极大值更新鸟群的移动速度和位置, 最终确定全局最优解。利用粒子群算法拟合瞬时值及幅值/频率波形的调制参数过程如图6所示。

1) 首先确定稳态幅值  $A_0$  频率  $\omega_0$ , 对瞬时值波形进行采样解调。

2) 设置种群迭代次数  $S$ , 粒子数量  $n$ , 以及权重  $c_1$ 、 $c_2$ , 初始化每个粒子的初始位置和速度, 其中每个粒子对应一组幅值/频率调制参数。

3) 根据当前每组幅值/频率调制参数的大小计算其适应度值, 用以评价该组幅值/频率调制参数与振荡原始波形的拟合效果。记录每组幅值/频率调制参数的历史最优参数(个体最优)以及当前种群中的最优参数(全局最优)。

4) 在每一代迭代中, 幅值/频率调制参数根据个体最优和全局最优的引导信息更新速度与位置, 搜索更优解。更新公式中引入惯性权重与学习因子以平衡全局搜索与局部收敛能力。

5) 若达到设定的最大迭代次数, 或全局最优解的变化趋于平稳, 则终止迭代, 输出最终的最优参数解。

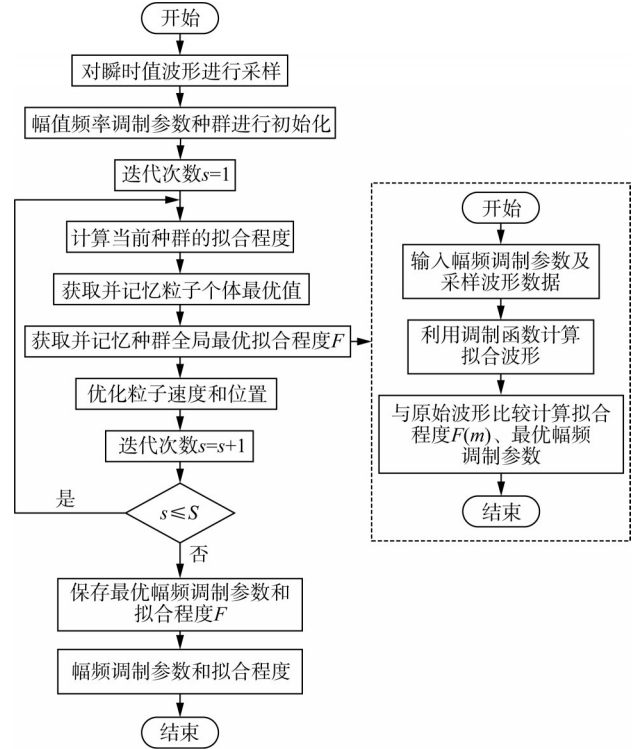


图6 基于粒子群算法的幅频调制信号解调流程图

Fig. 6 Flowchart of amplitude-frequency modulated signal demodulation based on the particle swarm optimization algorithm

## 3 仿真实验

为验证上述振荡信号幅频调制规律, 本节先以给定信号提取其调制参数验证算法的合理性, 然后结合仿真振荡波形提取其调制参数验证振荡信号幅频调制规律的正确性。考虑到多模态情况下三相瞬时值波形的复杂性, 可能出现幅值/频率参数不同但表现出的三相瞬时值波形十分相近的情况, 本文仅以单模态情况下的振荡信号为例, 验证幅频调制规律的正确性。

### 3.1 给定信号调制参数提取

给定一个二次调制信号, 其表达式如式(14)~(16)所示, 采用粒子群算法对二次调制信号进行拟合。

$$e_a(t) = A(t) \sin\left(\int_0^t \omega(t) dt + \varphi_0\right) \quad (14)$$

$$A(t) = \frac{A_0}{494} + \frac{k_{A0}}{1} e^{\int_0^t \frac{\omega_0}{4} dt} \sin\left(\int_0^t \frac{\omega_0}{30} dt\right) \quad (15)$$

$$\omega(t) = \frac{\omega_0}{100\pi} + \frac{k_{\omega_0}}{0.1} e^{\int_0^t \frac{\omega_0}{4} dt} \sin\left(\int_0^t \frac{\omega_0}{30} dt\right) \quad (16)$$

利用式(14)~(16)计算幅频调制波形,与给定波形相比较,以两个波形上对应点的偏离程度作为目标,利用粒子群算法对带有噪声的给定波形进行拟合,拟合结果如图7所示,可以看出给定波形与幅频调制波形几乎完全重合,仿真结果表明,信号存在背景噪声时,所提出的幅频调制特征解调方法仍能够准确提取振荡信号的幅值与频率演化特征。背景噪声未对调制参数的辨识结果产生显著影响,算法拟合波形与原始振荡信号保持高度一致,验证了该方法在存在噪声条件下的稳定性与有效性。表1中的幅频调制波形的解调结果也与给定波形实际取值相近,可以看出该算法拟合波形具有较高的准确性。

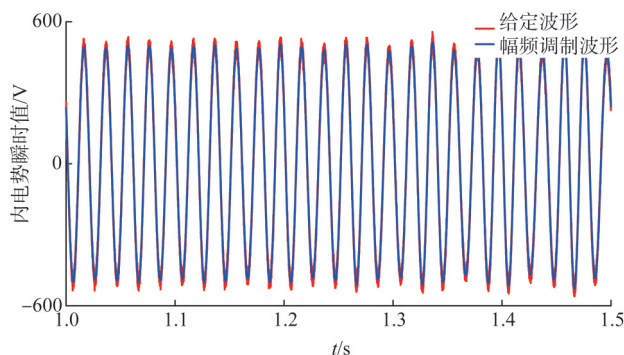


图7 给定幅频调制信号波形解调结果

Fig. 7 Demodulation results of the given amplitude-frequency modulated signal waveform

### 3.2 海风经交流线路集中送出系统振荡波形分析

为进一步验证电力系统动态过程中振荡信号的幅频调制规律,本文参考海风经交流长线路集中送出系统的实际电网拓扑和数据,在MATLAB/Simulink中搭建了图8所示的海风经交流长线路集中送出仿真模型。

仿真模型中,将海风场等效为3台直驱风机,3台风机分别通过海上升压站升至220 kV,进一步通过60 km海底电缆(用交流输电线替代)接入陆上

表1 给定幅频调制信号幅频特征提取结果

Tab. 1 Feature extraction results of the amplitude-frequency characteristics of the given amplitude-frequency modulated signal

| 参数                   | 实际取值     | 解调结果      | 准确率/% |
|----------------------|----------|-----------|-------|
| $A_0$                | 494      | 494       | 100   |
| $\omega_0$           | $100\pi$ | 314.159 3 | 100   |
| $\varphi_0$          | 1.066 3  | 1.066 3   | 100   |
| $\alpha_0$           | 4        | 3.987 7   | 99.69 |
| $\omega_0$           | $30\pi$  | 94.247 8  | 99.97 |
| $k_{A0}$             | 0.1      | 0.099 25  | 99.24 |
| $k_{\omega 0}$       | 0.1      | 0.098 77  | 98.75 |
| $\varphi_{\alpha 0}$ | 0.1      | 0.099 2   | 99.19 |
| $\varphi_{\omega 0}$ | 0.1      | 0.098 8   | 98.79 |

升压站,将电压升高至525 kV,进一步通过100 km交流输电线路与电网等效电压源连接。在0.1 s时,使直驱风机1的系统锁相频率偏离其稳态值0.05 rad/s,图9中可以看到直驱风机1内电势瞬时值波形与线路电流瞬时值波形从0.1 s开始正弦发生畸变,不再是一个幅值不变的正弦波形式,呈现出振荡发散的特征,说明系统趋于不稳定。

记录海上风电经交流输电线路集中系统中的直驱风机1内电势瞬时值波形,利用式(10)~(12)所刻画的幅值/频率函数,通过粒子群算法对内电势瞬时值波形进行拟合。由图10可以幅频调制波形与瞬时值原始波形完美吻合,为了进一步说明算法的解调效果,将拟合出的调制参数所刻画的内电势幅值/频率波形,与仿真模型所得到的直驱风机1内电势幅值/频率波形相对比,可以看出波形完美重合,进一步验证了算法的有效性,调制参数的解调结果如表2所示。

接着记录海上风电经交流输电线路集中系统中的直驱风机1线路电流瞬时值波形,利用式(10)~(12)所刻画的幅值/频率函数,通过粒子群算法对线路电流瞬时值波形进行拟合。由图11可以幅频

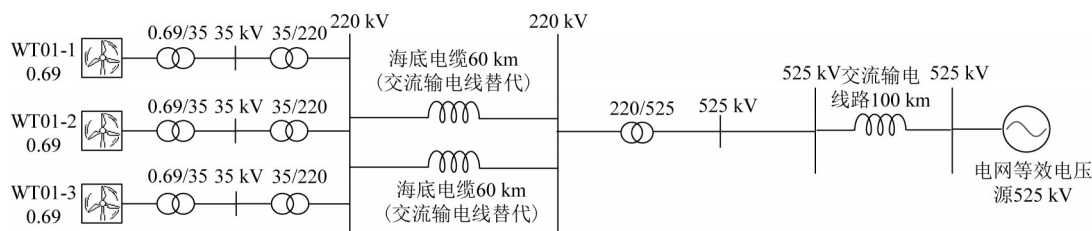


图8 海上风电经交流输电线路集中送出场景拓扑图

Fig. 8 Topology diagram of offshore wind power centralized transmission via AC lines

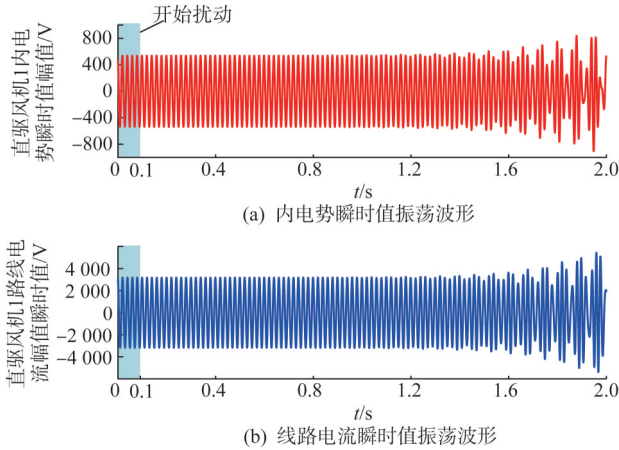


图9 直驱风机1内电势及线路电流瞬时值振荡波形

Fig. 9 Oscillation waveforms of internal voltage and line current instantaneous values of direct-drive wind turbine 1

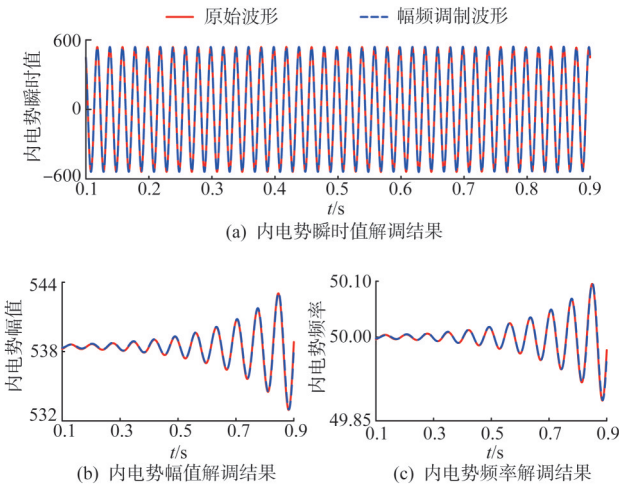


图10 直驱风机1内电势瞬时值拟合结果

Fig. 10 Fitting results of the instantaneous internal voltages of direct-drive wind turbine 1

表2 直驱风机1内电势瞬时值幅频特征提取结果

Tab. 2 Feature extraction results of the amplitude and frequency characteristics of the instantaneous internal electromotive force of direct-drive wind turbine 1

| 参数                   | 解调结果    |
|----------------------|---------|
| $A_0$                | 538.421 |
| $\omega_0$           | 314.159 |
| $\varphi_0$          | 0.593   |
| $\alpha_0$           | 4.701   |
| $\omega_0$           | 87.893  |
| $k_{A0}$             | 0.137   |
| $k_{\omega 0}$       | 0.017 6 |
| $\varphi_{\alpha 0}$ | 3.505   |
| $\varphi_{\omega 0}$ | 3.235   |

调制波形与线路电流原始波形完美吻合,为了进一步说明算法的解调效果,将拟合出的调制参数所刻画的线路电流幅值/频率波形,与仿真模型所得到的直驱风机1线路电流幅值/频率波形相对比,可以看出波形完美重合,进一步验证了算法的有效性,并将调制参数的解调结果如表3所示。

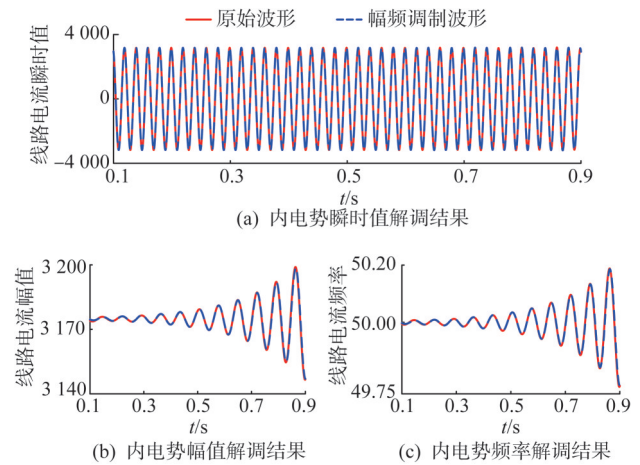


图11 直驱风机1线路电流瞬时值拟合结果

Fig. 11 Fitting results of the instantaneous line current of direct-drive wind turbine 1

表3 直驱风机1线路电流瞬时值幅频特征提取结果

Tab. 3 Feature extraction results of the amplitude and frequency characteristics of the instantaneous line currents of direct-drive wind turbine 1

| 参数                   | 解调结果     |
|----------------------|----------|
| $A_0$                | 3 174.92 |
| $\omega_0$           | 314.159  |
| $\varphi_0$          | 0.369    |
| $\alpha_0$           | 4.671    |
| $\omega_0$           | 87.825   |
| $k_{A0}$             | 0.666    |
| $k_{\omega 0}$       | 0.033    |
| $\varphi_{\alpha 0}$ | 2.040    |
| $\varphi_{\omega 0}$ | 2.126    |

由以上对内电势瞬时值、线路电流瞬时值的解调结果可以看出,幅频调制函数所刻画的振荡波形能够很好描述交变电气量振荡过程,同时本文所提算法对幅频调制参数的提取具有不错的效果。

由此可见,设备内电势幅值频率和线路电流幅值频率均以复指数形式进行振荡演化,同时复指数形式演化的内电势幅值频率和线路电流幅值频率最终体现在内电势瞬时值和线路电流瞬时值的振荡上

面,相比之下,傅里叶谐波虽然也能将内电势瞬时值分解成不同频率谐波叠加的形式,但由于内电势频率周期性变化且幅值不断增大,并非傅里叶谐波所描述的由特定整数倍频率的形式变化,傅里叶分解得到的谐波幅值和频率只是从数值上描述瞬时值的变化情况,而非从机理上刻画瞬时值是如何变化的,傅里叶谐波不具备实际的物理意义。

#### 4 动模波形

为了进一步验证论文成果的实用性,本文以电压源逆变器并网系统为例,参考文献[26]中动模仿真实验搭建平台,以稳定运行状态作为系统初始时刻,改变锁相环 $k_{pp}$ 和 $k_{ip}$ 控制参数,系统从平衡点开始发生自由振荡过程。记录电压源型逆变器内电势波形、控制回路输出的内电势瞬时值幅值/频率波形。

由图12中的电压源型逆变器内电势幅值和频率的振荡波形可以看出,内电势幅值/频率均以稳态工作点上叠加复指数形态演化,与前文仿真得到的振荡波形规律一致,将动模振荡波形瞬时值作为算法输入,利用粒子群算法对其解调,解调结果如图12所示,蓝色虚线为算法拟合的幅频调制波形,红色实线动模实验振荡波形可以看出,算法拟合瞬时值波形与实验电压源型逆变器端口内电势振荡波形重合,调制参数所计算出的内电势幅值/频率与实验电压源型逆变器控制回路形成的幅值/频率振荡波形重合。故本文所设计的解调算法可以有效获取决定振荡信号演化过程的幅值/频率调制参数。并通过仿真及动模实验结果验证了振荡信号幅频调制形成的合理性以及所提解调算法的有效性。

#### 5 结论

本文针对当前研究大都聚焦于交流瞬时值层面的振荡机理研究、缺乏对系统振荡能量交换物理机制的认识的问题,本文在系统动态过程交变信号分析的基础上,基于交变信号幅值/频率的演化机制,并提出了交变信号幅值/频率的函数演化形态,通过设计粒子群算法将振荡信号幅频调制特征进行提取,用于分析系统振荡信号发展演化过程,本文创新点和贡献如下。

1)不同于以往通过信号叠加或者分段逼近的形成分析系统振荡信号的方法,本文认识到电力系统

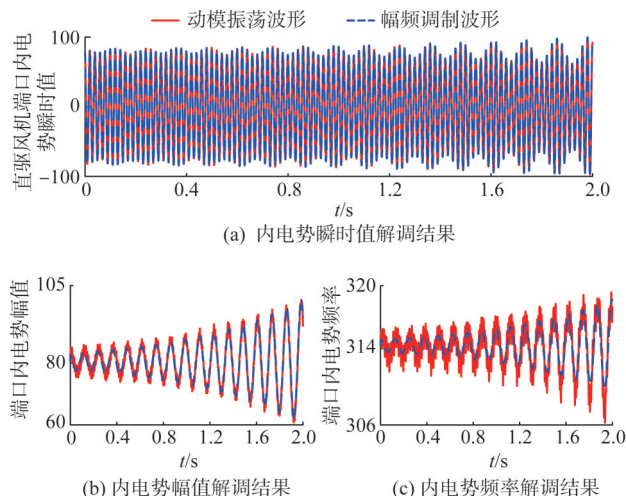


图12 动模实验振荡波形拟合结果

Fig. 12 Fitting results of oscillation waveforms in the dynamic model experiment

表4 动模实验振荡波形幅频特征提取结果

Tab. 4 Feature extraction results of the amplitude-frequency characteristics of the oscillation waveform from the dynamic simulation experiment

| 参数                   | 解调结果    |
|----------------------|---------|
| $A_0$                | 80.437  |
| $\omega_0$           | 313.970 |
| $\varphi_0$          | 0.374   |
| $\alpha_0$           | 1.02    |
| $\omega_0$           | 50.370  |
| $k_{A0}$             | 2.624   |
| $k_{\omega 0}$       | 0.606   |
| $\varphi_{a0}$       | 0.570   |
| $\varphi_{\omega 0}$ | 0       |

振荡信号幅值/频率的调制演化过程,即电气量幅值/频率在其稳态工作点上产生扰动是以一定幅值/频率的复指数函数形成演化。

2)本文提出了一种能够提取连续幅频调制信号振荡特征的方法,通过振荡特征形成的幅频调制波形与实际振荡波形具有很高的拟合程度,充分验证了振荡信号幅值/频率调制机制的合理性以及算法的有效性。

#### 参考文献

- [1] 李春曦,王佳,叶学民,等.我国新能源发展现状及前景[J].电力科学与工程,2012,28(4):1-8.  
LI Chunxi, WANG Jia, YE Xuemin, et al. Development and prospects of new energy in China [J]. Electric Power Science and Engineering, 2012, 28(4): 1-8.

- [2] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893 – 1904, 2205.  
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893 – 1904, 2205.
- [3] YUAN X, WANG S. Operating point identification from dimensions of alternating signal based on the incremental iterative mapping mechanism for analyzing dynamics of AC systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2025, 11(1): 163 – 172.
- [4] 王思成, 袁小明. 基于内电势幅值/频率和网络有功/无功电流工作点的变流器并网交流系统小扰动线性化方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(3): 1081 – 1094.  
WANG Sicheng, YUAN Xiaoming. Small-disturbance linearization method for converter interfaced AC power systems based on operating points of internal-voltage amplitude/frequency and networks' active/reactive current[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(3): 1081 – 1094.
- [5] 龚轩, 袁小明, 胡家兵. 锁相环对锁相型并网变流器有功/无功电流激励 – 内电势幅值/频率响应关系的影响机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(10): 3904 – 3916.  
GONG Xuan, YUAN Xiaoming, HU Jiabing. Influence mechanism of PLL on active/reactive current excitation and internal voltage amplitude/frequency response relationship of PLL-based VSC[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3904 – 3916.
- [6] HIYAMA T, SUZUKI N, FUNAKOSHI T. Real time FFT based on-line identification of power system oscillation modes[J]. IEEE Transactions on Power and Energy, 2000, 120(2): 134 – 140.
- [7] 张伏生, 耿中行, 葛耀中. 电力系统谐波分析的高精度 FFT 算法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 63 – 66.  
ZHANG Fusheng, GENG Zhongxing, GE Yaozhong. Fft algorithm with high accuracy for harmonic analysis in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3): 63 – 66.
- [8] 杜东冶, 郭春义, 杨硕, 等. 等频多通道信号跟踪和筛选的中高频振荡快速检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(18): 7030 – 7043.  
DU Dongye, GUO Chunyi, YANG Shuo, et al. Fast Detection method of medium-high-frequency oscillations based on equal-band multi-channel signal tracking and screening[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(18): 7030 – 7043.
- [9] 肖晋宇, 谢小荣, 胡志祥, 等. 电力系统低频振荡在线辨识的改进 Prony 算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004(7): 883 – 887.  
XIAO Jinyu, XIE Xiaorong, HU Zhixiang, et al. Improved Prony method for online identification of low-frequency oscillations in power systems[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2004(7): 883 – 887.
- [10] 王辉, 苏小林. Prony 算法的若干改进及其在低频振荡监测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 140 – 145.  
WANG Hui, SU Xiaolin. Several improvements of Prony algorithm and its application in monitoring low-frequency oscillations in power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 140 – 145.
- [11] NORDEN E H, ZHENG S, STEVEN R L, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Royal Society Publishing, 1998, 454(1971): 903 – 995.
- [12] 李天云, 高磊, 赵妍. 基于 HHT 的电力系统低频振荡分析[J]. 中国电机工程学报, 2006(14): 24 – 30.  
LI Tianyun, GAO Lei, ZHAO Yan. Analysis of Low frequency oscillations using HHT Method[J]. Proceedings of the CSEE, 2006(14): 24 – 30.
- [13] 季子杰, 胡家兵, 王思成, 等. 电力系统振荡信号瞬时幅值/频率的调制特征分析[J]. 电网技术, 2021, 45(11): 4577 – 4585.  
JI Zijie, HU Jiabing, WANG Sicheng, et al. Modulation characteristics analysis for instantaneous amplitude/frequency of power systems oscillation signals[J]. Power System Technology, 2021, 45(11): 4577 – 4585.
- [14] 张宇辉, 贺健伟, 李天云, 等. 基于数学形态学和 HHT 的谐波和间谐波检测方法[J]. 电网技术, 2008(17): 46 – 51.  
ZHANG Yuhui, HE Jianwei, LI Tianyun, et al. A new method to detect harmonics and inter-harmonics based on mathematical morphology and hilbert-huang transform[J]. Power System Technology, 2008(17): 46 – 51.
- [15] 任震, 黄雯莹, 何建军, 等. 小波分析及其在电力系统中的应用(一)概论[J]. 电力系统自动化, 1997(1): 9 – 11, 21.
- [16] PHILIP J G, YANG Y, JUNG J. Identification of power system oscillation modes using empirical wavelet transform and Yoshida-Bertecco algorithm[J]. IEEE Access, 2022(10): 48927 – 48935.
- [17] JHA R, SENROY N. Wavelet ridge technique based detection of forced oscillation in power system signal[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3306 – 3308.
- [18] PHILIP J G, YANG Y, JUNG J. Identification of power system oscillation modes using empirical wavelet transform and Yoshida-Bertecco algorithm[J]. IEEE Access, 2022(10): 48927 – 48935.
- [19] 宾子君. 电力系统动态行为的轨迹断面特征根分析[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [20] 严干贵, 郭剑宇, 王玉鹏. 面向次同步振荡分析的直驱风电场动态等值[J]. 电力建设, 2025, 46(10): 122 – 131.  
YAN Gangui, GUO Jianyu, WANG Yupeng. Dynamic equivalence of direct-drive wind farms for sub-synchronous oscillation characterization[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(10): 122 – 131.
- [21] 辛业春, 李尚轩, 王延旭, 等. 基于直流电流反馈的 MMC-HVDC 系统的中高频振荡抑制策略[J]. 中国电力, 2025, 58(1): 39 – 49.  
XIN Yechun, LI Shangxuan, WANG Yanxu, et al. Mid-and high-frequency oscillation suppression strategy for MMC-HVDC system based on DC current feedback[J]. Electric Power, 2025, 58(1): 39 – 49.
- [22] 周啸, 阳岳希, 寇龙泽, 等. 模块化多电平柔性直流换流器高频振荡抑制策略与参数优化设计[J]. 中国电力, 2025, 58(1): 50 – 60.  
ZHOU Xiao, YANG Yuexi, KOU Longze, et al. Strategy design and parameter optimization of high-frequency resonance suppression for modular multilevel converter[J]. Electric Power, 2025, 58(1): 50 – 60.
- [23] 徐政. 宽频振荡机理及其基于 C 型阻尼滤波器的抑制技术[J]. 南方电网技术, 2026, 20(1): 3 – 11, 23.

(下转第 95 页 Continued on Page 95)