

基于不确定性模态分析的风电场并网谐振研究

洪语蔚

(福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要: 风电场并网系统中由于参数不清、工况不定等不确定因素的存在, 将会导致系统谐振频率波动, 进而威胁系统的并网安全。对此, 提出了基于区间计算的不确定性模态分析方法, 研究了静止无功发生器 (SVG) 补偿容量变化下风电场并网系统的谐振频率变化特性。首先对含 SVG 的风电场并网系统进行分析, 建立了系统阻抗模型与 SVG 无功补偿容量区间模型; 然后以模态分析法为技术背景, 建立了 SVG 无功补偿区间与模态阻抗的仿射关系, 并基于网格分解与区间参数摄动法确定不同频率下模态阻抗的变化范围, 以得到系统的谐振频率变化情况; 最后以典型风电场并网系统为算例进行了数值仿真, 分析了谐振频率的分布情况, 并基于 MATLAB/Simulink 平台搭建了仿真模型, 验证了所提方法的有效性。
关键词: 风电场并网系统; 无功补偿; 谐波谐振; 模态分析; 区间计算

Uncertainty modal analysis method based on interval

HONG Yuwei

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The existence of uncertain factors such as unclear parameters and uncertain working conditions in wind farm grid-connected system will lead to the resonance frequency fluctuation of the system, which will threaten the safety of the grid-connected system. An uncertain modal analysis method based on interval calculation is proposed to study the resonant frequency variation characteristics of wind farm grid-connected system under static reactive power generator (SVG) compensation capacity variation. Firstly, the grid-connected wind farm system with SVG is analyzed, and the system impedance model and SVG reactive power compensation capacity interval model are established. Then, with modal analysis as the technical background, the affine relationship between SVG reactive power compensation interval and modal impedance was established, and the variation range of modal impedance at different frequencies was determined based on grid decomposition and interval parameter perturbation method, so as to obtain the resonant frequency variation of the system. Finally, a typical wind farm grid-connected system is taken as an example for numerical simulation, and the distribution of resonant frequency is analyzed. A simulation model based on MATLAB/Simulink platform is established to verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: wind farm grid connection system; reactive power compensation; harmonic resonance; modal analysis; interval calculation

0 引言

随着化石能源的枯竭以及环境的不断恶化, 新能源发电产业的发展逐渐趋于规模化^[1-4]。相比其他新型可再生能源, 风力发电技术开发的

潜力最为可观。然而, 在大型风电场并网发电过程中, 风机输出功率具有间歇性和波动性^[5-6], 极易引发各种复杂的并网电能质量问题。其中, 并网谐波谐振现象对电力系统的安全运营构成了

显著威胁^[7-9]。由于风电场通常经静止无功发生器 (Static Var Generator, SVG) 并网, 运行过程中SVG补偿容量的变化会引发系统参数的改变, 进一步影响并网系统的谐振频率。因此研究不确定因素对风电场并网系统谐波谐振的影响具有重要意义, 能够为风电场建设规划提供参考。

在谐振频率分析领域, 文献[10]提出了模态分析法, 能够准确提供系统的谐振频率, 已经成为运用最广泛的谐波谐振分析方法。文献[11-12]对多逆变器并网系统进行了模态分析, 无须建立复杂的高阶函数即可得到系统谐振模态与节点参与因子的变化规律。文献[13]计及长输电线对地分布电容对谐波谐振的影响, 对偏远风电场进行了模态分析。文献[14]提出了谐振带的概念, 通过模态分析法获取了机车谐波谐振的动态信息。然而, 现有研究中的模态分析法均只是对系统的谐波谐振进行确定性分析, 尚未考虑不确定变量对新能源并网系统的不确定性影响。

区间算法作为一种不确定性分析方法, 由Moore最早于1966年提出。文献[15-16]将区间算法运用于配电网三相潮流算法, 能够处理具有不确定性的点信息。对于存在多种概率分布未知的不确定因素的电力系统, 文献[17]通过区间理论定量分析, 实现了分布式电源 (Distributed Generator, DG) 优化配置。文献[18]引入区间可比较性, 基于区间极值理论, 将不确定性优化问题转化为两个确定性子优化问题进行求解, 提高了算法的完备性。针对区间算法可能存在迭代过程慢甚至不收敛的弊端, 文献[19]提出一种非嵌入式区间潮流计算方法, 避免了迭代过程, 大大提高了计算速度。上述文献说明了区间算法在处理含不确定性因素问题上的优越性, 但是它在电力系统中大多应用于DG的区间潮流计算, 并且未见将区间算法运用到含SVG的风电场并网系统中的研究。

针对现有研究没有考虑不确定因素对风电场并网系统谐振频率影响的不足, 本文在传统模态分析方法的基础上考虑系统参数的随机性, 提出了基于区间计算的不确定性模态分析方法。该方法建立了随机变量与模态阻抗的仿射关系, 并

基于网格分解与区间参数摄动法计算得到谐振频率的分布特性。数值仿真结果表明所提方法充分考虑了不确定因素的影响, 能够准确地获取风电场并网系统的谐振频率, 为谐波谐振治理提供依据。

1 风电场并网系统建模

1.1 直驱风机与SVG阻抗建模

当风电机组为直驱风机时, 与电网交互的宽频动态特性主要取决于网侧变流器, 本文在风电机组的阻抗建模工作中, 针对并网逆变器建立其序阻抗模型; 考虑采用两电平拓扑的SVG本质为稳态工作点不同的并网逆变器, 序阻抗模型的建立方法与风电机组的网侧变流器基本一致。而且, 已有研究表明, 在谐振中仅变流器的正序阻抗存在负阻性区间, 新能源并网系统谐波谐振现象的主要诱因在于系统级的正序阻抗失配^[20], 本文以风电机组和SVG的正序阻抗建模结果作为谐波谐振分析的基础。

以LCL滤波型风电机组网侧变流器为例, 利用谐波线性化方法, 基于傅里叶级数展开和卷积定理, 可推导变流器的正序阻抗表达式为^[21]

$$Z_p = \frac{B-D}{C-A} \quad (1)$$

式中, A 和 B 主要取决于滤波电路参数; C 和 D 主要取决于控制环路。

四个定义项的具体表达式为

$$A = 1 + \frac{R_1 C_f s + L_1 C_f s^2}{R_d C_f s + 1} \quad (2)$$

$$B = \frac{R_1 R_2 C_f s + R_1 L_2 C_f s^2 + R_2 L_1 C_f s^2 + L_1 L_2 C_f s^3}{R_d C_f s + 1} + \quad (3)$$

$$R_1 + sL_1 + R_2 + sL_2$$

$$C = \frac{1}{2} \left[\frac{V_1}{K_m V_{dc}} + \frac{\sqrt{3}U_n}{3} (P - jQ) H_i (s - j2\pi f_1) + \right. \quad (4)$$

$$\left. jK_d \frac{\sqrt{3}U_n}{3} (P - jQ) \right] T_{PLL} (s - j2\pi f_1)$$

$$D = [-H_i (s - j2\pi f_1) + jK_d] K_m V_{dc} \quad (5)$$

式中, R_1 和 L_1 分别为逆变器侧电阻与电感; R_2 和

L_2 分别为网侧电阻与电感； C_f 为滤波电容； R_d 为滤波电容串联电阻； V_{dc} 为直流电压； V_1 为单相电压的幅值； U_n 为母线额定电压； f_1 为基波频率； K_m 为桥臂电压传递系数； K_d 为解耦系数； $H_i(s)$ 为PI环节的传递函数。

$T_{PLL}(s)$ 的定义为

$$T_{PLL}(s) = H_{PLL}(s) / [V_1 H_{PLL}(s) + 1] \quad (6)$$

式中， $H_{PLL}(s)$ 为锁相环PI控制器的传递函数。

1.2 SVG补偿容量建模

对于接入无功补偿装置SVG的风电场并网系统，当无功补偿装置SVG的补偿容量发生变化时，该风电场并网系统的谐振频率也会发生变化^[22]。故本文将SVG的补偿容量视为随机变量，变化范围为

$$Q_{SVG} \in [-Q_B, Q_B] \quad (7)$$

式中， Q_{SVG} 为SVG的实际补偿容量； Q_B 为SVG的额定容量，决定了SVG的动态调节能力。

1.3 含SVG风电场并网系统等效电路模型

典型的风电场拓扑如图1所示，风电机组变流器与SVG并联于公共耦合点（Public of Common Coupling, PCC）^[23-24]。

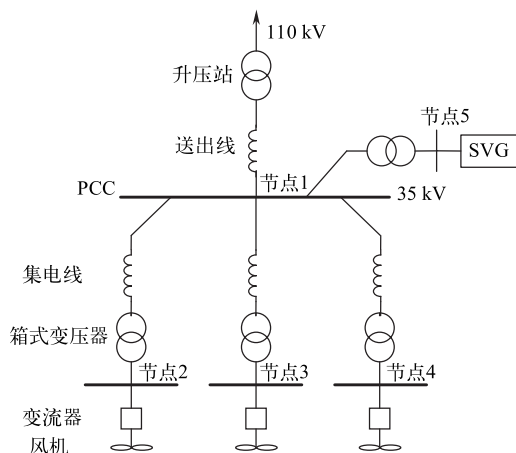


图1 大型风电场并网系统结构图

Fig. 1 Grid connection system structure drawing of large wind farm

基于风电机组、SVG、集电线路和风电场并网阻抗的建模结果，以图1所示的含三台等效风电机组的风电场拓扑为例，可建立等效电路

模型如图2所示，用于生成节点导纳矩阵并开展模态分析。图2中， $Z_g(s)$ 为电网等效阻抗； $Z_{12}(s) \sim Z_{15}(s)$ 为连接风机/SVG与PCC的阻抗，综合考虑了集电线阻抗与折算到低压侧的变压器等效阻抗； $Z_{m1}(s) \sim Z_{m4}(s)$ 为变压器Γ形等效电路中的励磁支路阻抗；构建风电机组与SVG的等效电路时采用等效电压源模型，其中， $Z_{w1}(s) \sim Z_{w3}(s)$ 为风电机组的序阻抗建模值， $Z_{SVG}(s)$ 为SVG的正序阻抗建模值。

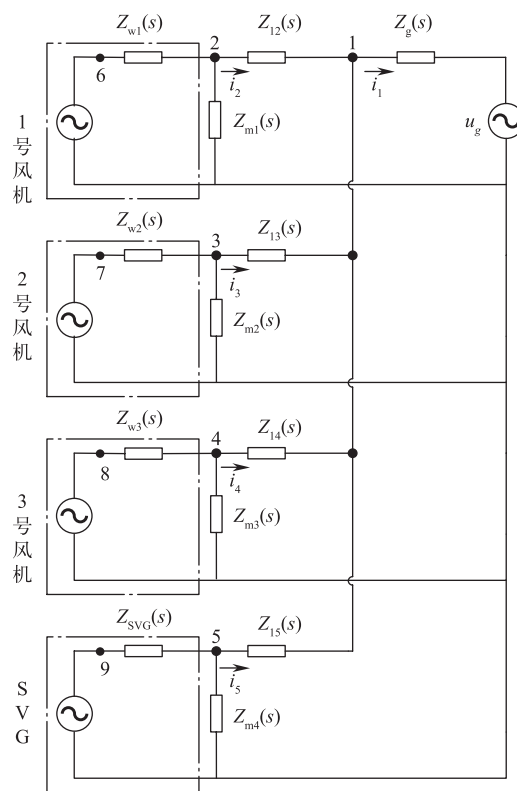


图2 大型风电场并网系统结构图

Fig. 2 Equivalent circuit for wind farm grid-connected modal analysis

假设 $Y(s)$ 是图2所示电路的节点导纳矩阵，各元素表达式为

$$Y_{11}(s) = \frac{1}{Z_g(s)} + \sum_{i=2}^5 \frac{1}{Z_{1i}(s)} \quad (8)$$

$$\begin{cases} Y_{pp}(s) = \frac{1}{Z_{w(p+1)}(s)} + \frac{1}{Z_{1p}(s)} + \frac{1}{Z_{mp}(s)} \\ Y_{1p}(s) = -\frac{1}{Z_{1p}(s)} \\ \forall p \in \{2, 3, 4\} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} Y_{55}(s) = \frac{1}{Z_{\text{SVG}}(s)} + \frac{1}{Z_{15}(s)} + \frac{1}{Z_{m5}(s)} \\ Y_{59}(s) = -\frac{1}{Z_{\text{SVG}}(s)} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} Y_{qq}(s) = \frac{1}{Z_{w(q-5)}(s)} \\ Y_{pq}(s) = -\frac{1}{Z_{w(q-1)}(s)} \\ \forall q \in \{6, 7, 8\} \end{cases} \quad (11)$$

$$Y_{99}(s) = \frac{1}{Z_{\text{SVG}}(s)} \quad (12)$$

2 基于区间的不确定性模态分析方法

2.1 传统模态分析法

模态分析法是谐振分析中的常见方法，其基本思路为：节点导纳矩阵 $\mathbf{Y}$ 的逆矩阵中出现极大元素会引发系统的并联谐波谐振现象。当 $\mathbf{Y}$ 矩阵的某个特征根为零或者极为接近于零时， $\mathbf{Y}$ 矩阵趋于奇异，则 $\mathbf{Y}^{-1}$ 矩阵中将会出现极大元素，从而使得系统中出现电压极大值，最后引发多种电能质量问题。模态分析法的数学描述：若系统产生频率为 f 的并联谐振现象，则节点电压、电流方程为

$$\mathbf{V}_f = \mathbf{Y}_f^{-1} \mathbf{I}_f \quad (13)$$

式中， $\mathbf{Y}_f$ 为在频率 f 处的并网系统节点导纳矩阵； $\mathbf{V}_f$ 和 $\mathbf{I}_f$ 分别为节点电压和节点注入电流向量。

节点导纳矩阵 $\mathbf{Y}_f$ 可分解为

$$\mathbf{Y}_f = \mathbf{L} \mathbf{A} \mathbf{T} \quad (14)$$

式中， $\mathbf{A}$ 为对角特征值矩阵， $\mathbf{A} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k, \dots)$ ； $\mathbf{L}$ 、 $\mathbf{T}$ 分别为左、右特征向量矩阵，且有 $\mathbf{L} = \mathbf{T}^{-1}$ 。

将式(14)代入式(13)得

$$\mathbf{V}_f = \mathbf{L} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{T} \mathbf{I}_f \quad (15)$$

定义 $\mathbf{U}_f = \mathbf{T} \mathbf{V}_f$ 为模态电压向量， $\mathbf{J}_f = \mathbf{T} \mathbf{I}_f$ 为模态电流向量，则有 $\mathbf{U}_f = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{J}_f$ ，即

$$\begin{pmatrix} \mathbf{U}_{f1} \\ \mathbf{U}_{f2} \\ \vdots \\ \mathbf{U}_{fn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_{f1}^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{f2}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{fn}^{-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{J}_{f1} \\ \mathbf{J}_{f2} \\ \vdots \\ \mathbf{J}_{fn} \end{pmatrix} \quad (16)$$

$\mathbf{A}^{-1}$ 的单位是阻抗，通常被命名为模态阻抗。由式(16)知，当系统发生并联谐振时，若 $\lambda_{f1}=0$ 或非常小，则很小的模态1注入电流 $\mathbf{J}_{f1}$ 将导致很大的模态电压 $\mathbf{U}_{f1}$ 。即在模态域中，根据特征值倒数易于识别出谐振发生的位置。

2.2 基于区间计算的模态分析法

由前文可知，当SVG的补偿容量 Q_{SVG} 为确定值时，频率 f 下系统的节点导纳矩阵 $\mathbf{Y}_f$ 即为确定的数值，此时根据传统的模态分析法即可确定系统是否发生谐振。然而实际运行中 Q_{SVG} 是一个随机变量，可能为区间 $[-Q_B, Q_B]$ 中的任何一个数值，使得系统的模态阻抗同样是一个随机变量，需要通过区间计算确定模态阻抗的范围。

2.2.1 区间的基本概念

区间算术是指在实数域内，用已知的上界与下界来表示一个不确定量，记这个不确定量为区间数 $[A]$ ，即

$$[A] = [\underline{a}, \bar{a}] = \{a \in R \mid \underline{a} \leq a \leq \bar{a}\} \quad (17)$$

式中， $\underline{a}$ 表示区间 $[A]$ 的下界； $\bar{a}$ 表示区间 $[A]$ 的上界。当 $\underline{a} = \bar{a}$ 时，区间 $[A]$ 退化为点区间，等效于确定的点值。

对于任意给定区间数 $[A] = [\underline{a}, \bar{a}] \in I(R)$ ， $[B] = [\underline{b}, \bar{b}] \in I(R)$ 和 $[C] = [\underline{c}, \bar{c}] \in I(R)$ ，加减乘除四则运算可表示为

$$[A] + [B] = [\underline{a}, \bar{a}] + [\underline{b}, \bar{b}] = [\underline{a} + \underline{b}, \bar{a} + \bar{b}] \quad (18)$$

$$[A] - [B] = [\underline{a}, \bar{a}] - [\underline{b}, \bar{b}] = [\underline{a} - \bar{b}, \bar{a} - \underline{b}] \quad (19)$$

$$\begin{aligned} [A] \times [B] &= [\underline{a}, \bar{a}] \times [\underline{b}, \bar{b}] \\ &= [\min(\underline{a}\underline{b}, \underline{a}\bar{b}, \bar{a}\underline{b}, \bar{a}\bar{b}), \max(\underline{a}\underline{b}, \underline{a}\bar{b}, \bar{a}\underline{b}, \bar{a}\bar{b})] \end{aligned} \quad (20)$$

$$\frac{[A]}{[B]} = [\underline{a}, \bar{a}] \times \left[\frac{1}{\bar{b}}, \frac{1}{\underline{b}} \right], 0 \notin [B] \quad (21)$$

由于区间运算具有一定的封闭性，其代数性质与常数的运算法则也有所差异，从上述运算规则可以得出，区间之间相加、相乘仍然满足交换律和结合律。不同点在于不满足乘法的分配率，但满足次分配率。设 $[A], [B], [C] \in I(R)$ ，即

$$\begin{aligned} [A] \times ([B] \pm [C]) &= [A] \times [B] \pm [A] \times [C] \\ \left\{ \begin{aligned} [A] \times ([B] \pm [C]) &\subseteq [A] \times [B] \pm [A] \times [C] \\ ([A] \pm [B]) \times [C] &\subseteq [A] \times [C] \pm [B] \times [C] \end{aligned} \right. \quad (22) \end{aligned}$$

显然，SVG的补偿容量可记为区间数 $[Q_{\text{SVG}}]$ ，模态阻抗同样是一个区间数，可记为 $[\lambda_f]$ ，不确定性模态分析即为确定 $[Q_{\text{SVG}}]$ 与映射 $[\lambda_f]$ 关系的过程。

2.2.2 基于网格分解与摄动法的区间计算

由上述可知 $[Q_{\text{SVG}}]$ 与 $[\lambda_f]$ 具有复杂的映射关系，无法通过简单的区间运算得到，为此提出了基于网格分解与摄动法的区间计算方法。

其中网格分解常用于有限元分析，其核心思想是将区间数分解为多个更小的区间进行计算。因此 $[Q_{\text{SVG}}]$ 可以等分为 n 个区间，即

$$\begin{aligned} [Q_{\text{SVG}}] &= [-Q_B, Q_B] = -Q_B + [0, 2Q_B] \\ &= -Q_B + \left[0, \frac{2}{n}Q_B\right] \cup \dots \cup \left[\frac{2(k-1)}{n}Q_B, \frac{2k}{n}Q_B\right] \\ &\quad \cup \dots \cup \left[\frac{2(n-1)}{n}Q_B, 2Q_B\right] \quad (23) \end{aligned}$$

定义第 k 个区间数为 $[Q_{\text{SVG}}]_k$ ，即

$$\begin{aligned} [Q_{\text{SVG}}]_k &= -Q_B + \left[\frac{2(k-1)}{n}Q_B, \frac{2k}{n}Q_B\right] \\ &= \left[\frac{2k-n-2}{n}Q_B, \frac{2k-n}{n}Q_B\right] \quad (24) \end{aligned}$$

每个SVG补偿容量区间均对应一个模态阻抗区间，因此定义区间数 $[Q_{\text{SVG}}]_k$ 对应的模态阻抗为 $[\lambda_f]_k$ 。进一步参照文献[25]，依据矩阵摄动理论和区间扩张理论计算 $[\lambda_f]_k$ 。

首先定义矩阵的标准特征值问题为

$$\begin{cases} A^C u_{ci} = \lambda_{ci} u_{ci} \\ u_{ci}^T u_{ci} = 1 \end{cases} \quad (25)$$

式中， A^C 为 n 维对称矩阵； λ_{ci} 为其特征值； u_{ci} 为相应的标准正交特征向量。

设 δA 为一对称矩阵，矩阵 A^C 经 δA 这一小扰动变为 $(A^C + \delta A)$ ，摄动后的特征值方程为

$$(A^C + \delta A) u_i = \lambda_i u_i \quad (26)$$

在略去二阶以上的小扰动量的基础上，结合矩阵摄动理论， λ_i 可表示为

$$\lambda_i = \lambda_{ci} + \delta \lambda_i \quad (27)$$

其中

$$\delta \lambda_i = u_{ci}^T \delta A u_{ci} \quad (28)$$

在 A^C 已知，小扰动量 δA 未知，但已知其变化范围 $\Delta A' = [-\Delta A, \Delta A]$ 的条件下，需要求解式(26)的特征值 λ_i 的变化区间

$$\lambda_i' = [\underline{\lambda}_i, \bar{\lambda}_i] \quad (29)$$

根据区间扩张理论，可以得到特征值的区间扩张为

$$\lambda_i' = \lambda_{ci} + \delta \lambda_i' \quad (30)$$

其中

$$\delta \lambda_i' = u_{ci}^T \Delta A' u_{ci} = [\delta \underline{\lambda}_i, \delta \bar{\lambda}_i] \quad (31)$$

$$\delta \underline{\lambda}_i = \min \{-u_{ci}^T \Delta A u_{ci}, u_{ci}^T \Delta A u_{ci}\} \quad (32)$$

$$\delta \bar{\lambda}_i = \max \{-u_{ci}^T \Delta A u_{ci}, u_{ci}^T \Delta A u_{ci}\} \quad (33)$$

而 λ_{ci} 和 u_{ci} 满足方程

$$\begin{cases} A^C u_{ci} = \lambda_{ci} u_{ci} \\ u_{ci}^T u_{ci} = 1 \end{cases} \quad (34)$$

从而，特征值的变化区间为

$$\lambda_i' = [\underline{\lambda}_i, \bar{\lambda}_i] = \lambda_{ci} + \delta \lambda_i' = [\lambda_{ci} + \delta \underline{\lambda}_i, \lambda_{ci} + \delta \bar{\lambda}_i] \quad (35)$$

在上述方法下， $[Q_{\text{SVG}}]_k$ 仅需通过简单的区间运算即可得到 $[\lambda_f]_k$ ，最后对 n 个区间取并集即可还原 $[\lambda_f]$ ，即

$$[\lambda_f] = [\lambda_f]_1 \cup \dots \cup [\lambda_f]_k \cup \dots \cup [\lambda_f]_n \quad (36)$$

需要注意的是，摄动法仅在较小的扰动量下有效，因此区间数 $[Q_{\text{SVG}}]_k$ 的上下界应尽可能接近，这意味着 n 的取值应足够大，从而确保 $[\lambda_f]$ 的准确性，在实际应用中通常取 $n=100$ ，以兼顾准确性与计算效率。

2.2.3 SVG接入的风电场并网系统谐振分析流程

针对接入无功补偿装置SVG的风电场并网系统，利用基于网格分解与摄动法的区间不确定性模态分析方法，研究并网谐振情况的步骤归纳如下，方法流程图如图3所示。

1) 依据前文介绍方法对风电场并网系统进行阻抗建模，并且形成SVG补偿容量的区间表达式 $[Q_{\text{SVG}}]$ 。

- 2) 设定谐振频率的考察范围 $[f_1, f_2]$ ，令 $f=f_1$ 。
- 3) 将 $[Q_{\text{SVG}}]$ 网格分解为等分区间 $[Q_{\text{SVG}}]_k$ ， $k=1, 2, \dots, n$ 。依据模态分析方法并结合矩阵摄动理论和区间扩张理论逐一计算 $[Q_{\text{SVG}}]_k$ 下系统节点导纳矩阵特征值的变化范围 $[\lambda_p]_k$ 。
- 4) 依据式(36)还原 $[\lambda_p]$ ，求逆后得到频率 f 下的模态阻抗变化范围 $[\mathbf{A}^{-1}]_f$ ，令 $f=f+\Delta f$ ，返回步骤3)。
- 5) 当频率考察范围遍历完成时，归纳得到全域内的模态阻抗变化情况 $[\mathbf{A}^{-1}]$ ，进而可获得系统在SVG接入容量不定时的系统谐振频率变化范围。

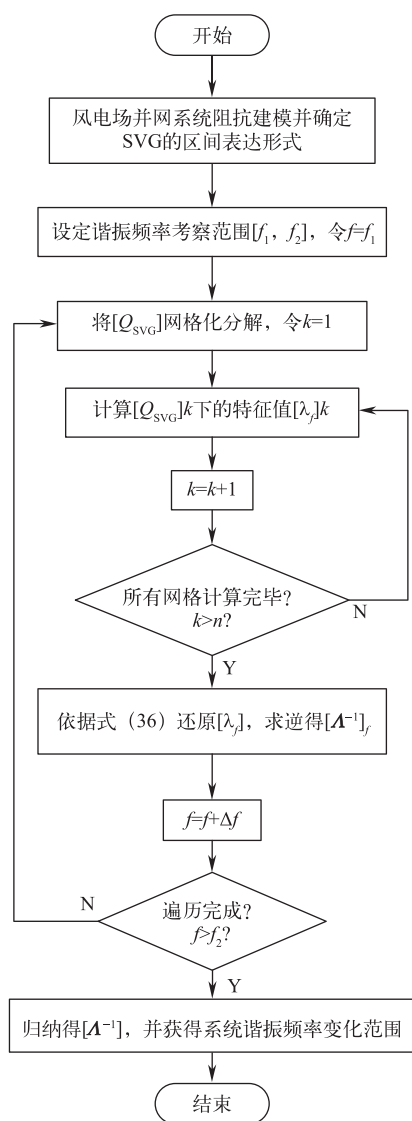


图3 不确定性模态分析流程图

Fig. 3 Flow chart of uncertain modal analysis

3 算例分析

为验证基于区间的不确定性模态分析法分析风电场并网系统谐振现象的可行性，以图1所示的风电场为例分析并网系统谐振。该算例中，风电场总容量为4.8 MW，3台额定容量为1.6 MW的等效风电机组分布于3条集电线。风机输出电压额定值为690 V，经箱式变压器升压至35 kV，再经过主变压器升压至110 kV并入电网，在35 kV的PCC母线加装了SVG作为无功补偿装置。并网系统具体参数见表1。

表1 风电场并网系统主要参数

Tab. 1 Parameters of grid-connected wind farm systems

设备	参数取值
并网系统	并网电压 110 kV，并网频率 50 Hz
箱式变压器	690 V/35 kV，额定容量 2 MV·A
升压站主变压器	35 kV/110 kV，额定容量 50 MV·A
集电线路	长度为 1.8 km 每千米电阻为 0.035 Ω，电抗为 0.05 Ω
LCL 滤波器	机侧电感 95 μH，网侧电感 40 μH，滤波电容 420 μF，滤波电容支路电阻为 0.26 Ω
风电机组	额定功率 1.6 MW，直流侧电压 1 100 V 锁相环系数 $K_p=0.35$ ， $K_i=57$ 电流环系数 $K_p=0.62$ ， $K_i=205$
SVG	SVG 额定功率 500 kvar，L 型滤波电感 210 μH SVG 锁相环系数 $K_p=0.28$ ， $K_i=49$ SVG 电流环系数 $K_p=0.58$ ， $K_i=115$

基于图1的并网结构图和表1的并网系统参数及序阻抗建模结果，采用不确定性模态分析法，分析当接入并网点的SVG补偿容量变化区间为 $[-500, -24] \cup [24, 500]$ kvar时的系统谐振信息，得到模式1~9下对应的模态阻抗区间如图4所示。

需特别指出的是，变流器的阻抗模型是在特定稳定工作点上小信号线性化建模的结果，当电感电流基波小于电感电流纹波峰-峰值的2倍时，开关的死区效应导致小信号也存在显著的非线性特征，进而导致理想的线性化阻抗模型不准确。在本文的算例中，电感电流纹波约为10 A，考虑电流基波20 A时SVG的补偿容量为24 kvar，SVG补偿容量在 $[-24, 24]$ kvar这一区间变化时，阻抗理论建模不适合直接应用于分析谐振特征，因此在谐振分析时剔除该区间。

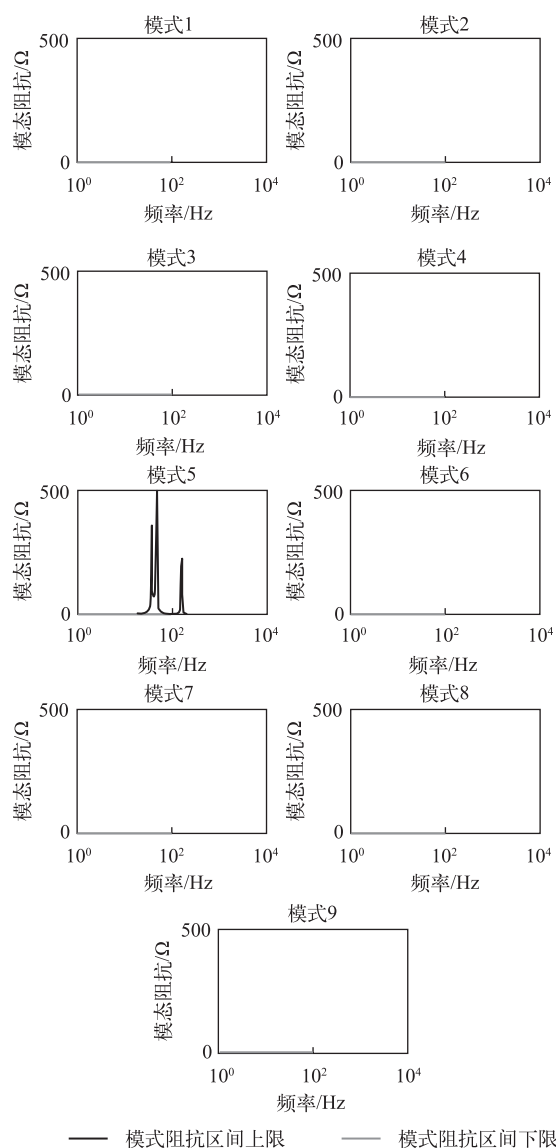


图4 不确定性模态分析结果

Fig. 4 Results of uncertain modal analysis

从图4可以看出, 模式5为并网系统的谐振模式, 其他8个模式下不会发生明显谐振。因此, 以谐振模式5为研究对象。当接入并网点的SVG补偿容量变化区间为 $[-500, -24] \cup [24, 500]$ kvar时, 得到的并网系统在谐振模式5下的模态阻抗区间, 为验证不确定性模态分析法的准确性, 在图4中加入给定SVG补偿容量的10组模态阻抗曲线进行对比, 结果如图5所示。图5中加箭头的两条曲线代表 $Q_{\text{SVG}}=[24, 500]$ kvar与 $Q_{\text{SVG}}=[-500, -24]$ kvar时的模态阻抗区间上限, 由于模态阻抗区间下限趋近于0, 因此在图例中不再标出。

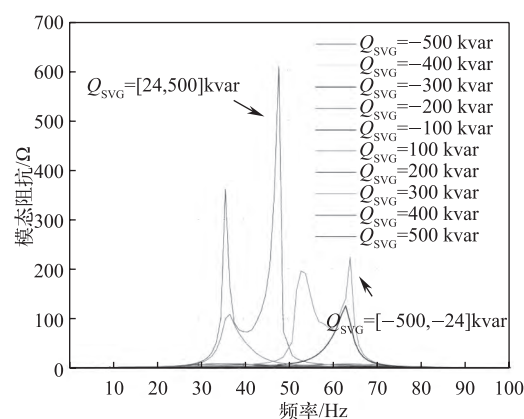
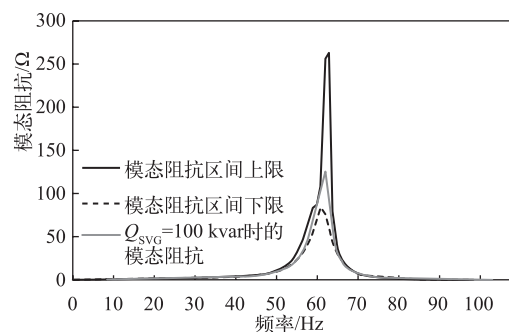


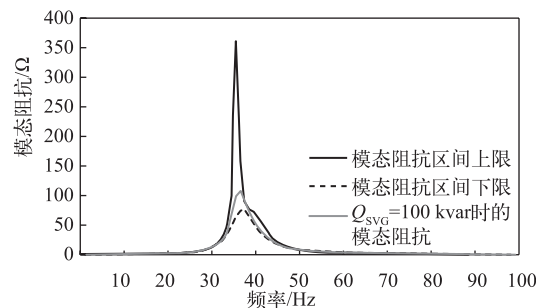
图5 谐振模式5下的模态阻抗变化范围

Fig. 5 The range of modal impedance variation in resonant mode 5

根据图5可知, 并网系统在谐振模式5下可能发生谐振频率区间为 $[36, 48]$ Hz与 $[52, 64]$ Hz的近同步谐振; 同时可得, 当 $Q_{\text{SVG}} \geq 100$ kvar时, 不会发生明显谐振。为进一步验证不确定性模态分析法的准确性, 分别对 $Q_{\text{SVG}}=[-105, -95]$ kvar和 $Q_{\text{SVG}}=[95, 105]$ kvar的情况进行分析, 与确定性模态分析结果进行对比, 结果如图6所示。



(a) $Q_{\text{SVG}}=[-105, -95]$ kvar时的分析结果



(b) $Q_{\text{SVG}}=[95, 105]$ kvar时的分析结果

图6 不确定性与确定性模态分析结果对比

Fig. 6 Comparison of uncertainty and deterministic modal analysis results

由图6可知,确定性模态分析得到的模态阻抗曲线均包含在模态阻抗的区间范围内,验证了不确定性模态分析法的可行性。基于此,可进一步分析SVG补偿容量与系统谐振频率的关联特性。当SVG补偿容量在 $[-500, -24] \cup [24, 500]$ kvar变化时,可能出现的谐振频率区间如图7所示。当SVG发出无功时,对应本文补偿容量的负值,并网系统在谐振频率上表现为超同步谐振;反之,当SVG吸收无功时,并网系统谐振表现为次同步谐振。

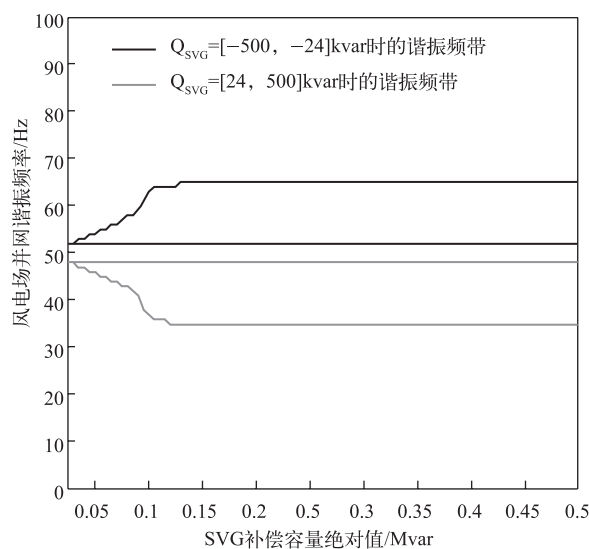


图7 SVG补偿容量变化时谐振模式5下的谐振频带

Fig. 7 SVG compensates the resonant band in resonant mode 5 when capacity changes

根据图7可知,当SVG补偿容量为 -130 kvar和 130 kvar时,谐振频率区间的最大值与最小值开始出现。典型补偿容量下的系统谐振频率变化范围见表2。

表2 不同SVG补偿容量区间对应的谐振频率区间

Tab. 2 The resonant frequency interval corresponding to different SVG compensation capacity interval

SVG 补偿容量区间 /kvar	谐振频率变化区间 /Hz
$[-100, -24] \cup [24, 100]$	$[38, 48] \cup [52, 62]$
$[-200, -24] \cup [24, 100]$	$[36, 48] \cup [52, 64]$
$[-300, -24] \cup [24, 300]$	$[36, 48] \cup [52, 64]$
$[-400, -24] \cup [24, 400]$	$[36, 48] \cup [52, 64]$
$[-100, -24] \cup [24, 100]$	$[36, 48] \cup [52, 64]$

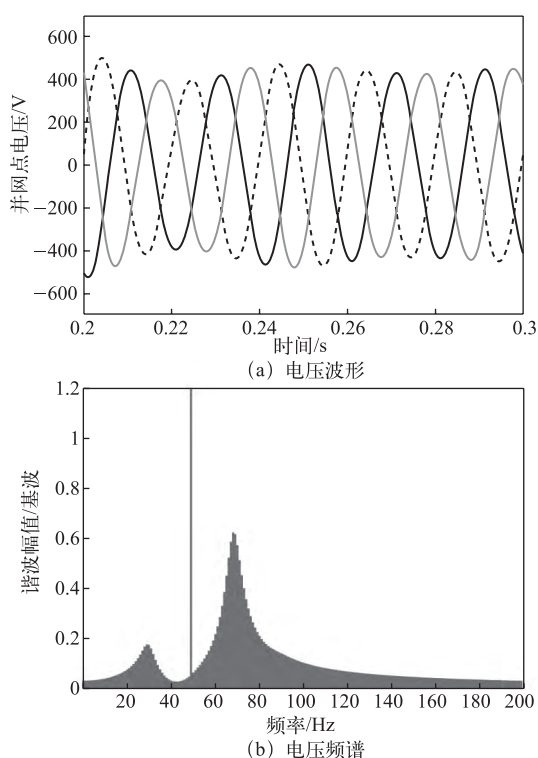
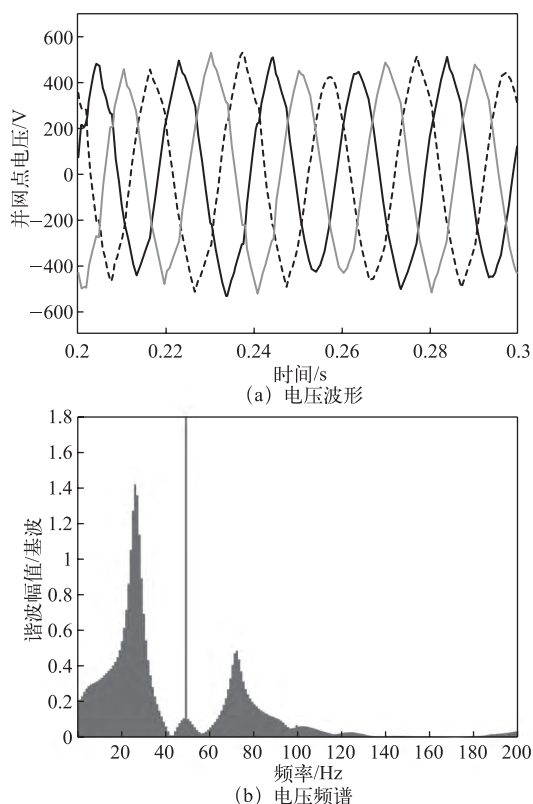
分析表2可知,当系统接入的SVG补偿容量为 $[-100, -24] \cup [24, 100]$ kvar时,系统谐振频率变化区间为 $[38, 48] \cup [52, 62]$ Hz,变化范围较小。当SVG补偿容量不断增大时,系统可能出现的谐振频率范围将进一步增大。因此,在配置SVG设备时,需要在满足系统要求下尽可能地降低SVG配置的补偿容量,以缩小谐振频率可能出现的范围,为进一步谐振治理减轻负担。

4 仿真验证

为进一步验证上述谐振的频率理论分析,根据图1所示的拓扑和表1所示的参数,在MATLAB/Simulink中搭建风电场并网系统的时域仿真模型。考虑风电出力具有显著的随机性和波形性,等效于系统中长时存在宽频扰动量。在仿真中,令风电机组出力波动后恢复稳定,扰动量消失后的节点电压的振荡过程即揭示了系统谐振点信息。根据遍历SVG补偿容量为 $[-500, -24] \cup [24, 500]$ kvar的范围内的系统谐振频率情况,当SVG补偿容量为 -130 kvar和 130 kvar时,分别对应谐振频率的最大值与最小值。故以下重点依据并网点谐振电压的波形和频谱,分析SVG无功补偿容量为 -130 kvar和 130 kvar时的系统谐振特征。

当SVG补偿容量为 -130 kvar时,扰动量消失后 0.1 s内节点5的时域波形如图8a所示,存在明显的振荡过程;为使谐振分析频率准确度为 1 Hz,对扰动量消失后 1 s内电压数据进行离散傅里叶变换,所得的频谱如图8b所示,可以看出,仿真所得主导谐振频率为 70 Hz。并网逆变器在同步旋转坐标系下采用 dq 控制分别调节并网有功和无功,与工频对称的频率分量在同步旋转坐标系下为同一频率值,导致了并网逆变器的序阻抗模型中存在一定程度的正负序耦合,即镜像频率耦合效应。因此,电压频谱中除了超同步的主导谐振点以外,还存在一定的次同步谐波分量。

当SVG补偿容量为 130 kvar时,时域波形和频谱分析结果如图9所示。仿真所得主导谐振频率为 27 Hz。

图8 $Q_{SVG} = -130$ kvar 时的仿真结果Fig. 8 Simulation results when $Q_{SVG} = -130$ kvar图9 $Q_{SVG} = 130$ kvar 时的仿真结果Fig. 9 Simulation results when $Q_{SVG} = 130$ kvar

综合两个仿真组的数据,时域仿真得出的谐振频率与前文理论分析的对比见表3,存在6 Hz/8 Hz的偏差。存在该频率偏差的原因为:本文在分析谐振频率时,考虑在谐振过程中起主导作用的阻抗为正序阻抗,未建立镜像频率耦合效应对谐振影响的数学模型。但是,从结果中可以看出,频率镜像耦合效应影响有限,仿真所得谐振频率变化趋势与理论分析结果基本一致,Simulink模型的时域仿真证明了本文提出的基于区间的不确定性模态分析方法具备有效性。

表3 理论与仿真谐振频率对比

Tab. 3 Comparison of theoretical and simulated resonant frequencies

SVG 补偿容量 /kvar	理论谐振频率 /Hz	仿真谐振频率 /Hz	谐振频率偏差 /Hz
-130	64	70	6
130	35	27	8

5 结束语

本文基于区间算法,提出基于区间的不确定性模态分析方法,实现了对不同SVG容量接入下的风电场并网系统的谐振频率范围分析,得出结论如下:

1) 本文将系统中的SVG补偿容量作为区间变量,从而推导相应的节点导纳区间矩阵,符合实际风电并网系统中存在的参数不清、工况不定等不确定性情况。与传统的模态分析方法不同,该方法充分考虑到风电场参数不确定性对谐波谐振的影响,弥补了传统模态分析法只能对谐波谐振进行确定性分析的不足。

2) 通过分析不同谐振模式下SVG无功补偿容量与并网系统谐振频率的关联,发现接入额定容量越大的SVG,在其变化范围内,可能产生的谐振频率范围越大。此外,分析获得的不同SVG补偿容量下的模态阻抗曲线及谐振频率变化规律能够作为谐波谐振治理的依据。

参考文献

- [1] 陈国平,李明节,许涛,等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报, 2017,

- 37(1): 20-27.
- [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.
- [3] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-475.
- [4] 韩肖清, 李廷钧, 张东霞, 等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3036-3046.
- [5] 薛禹胜, 雷兴, 薛峰, 等. 关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5029-5040.
- [6] 迟永宁, 梁伟, 张占奎, 等. 大规模海上风电输电与并网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3758-3771.
- [7] 戎骏. 大规模风电并网的谐波谐振与谐波不稳定研究[D]. 四川: 西南交通大学, 2017.
- [8] LIU Z, RONG J, ZHAO G, et al. Harmonic assessment for wind parks based on sensitivity analysis[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(4): 1373-1382.
- [9] 樊熠, 张金平, 谢健, 等. 风电场谐波谐振测试与分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(2): 147-151.
- [10] 徐文远, 张大海. 基于模态分析的谐波谐振评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 92-96.
- [11] 刘洋, 帅智康, 李杨, 等. 多逆变器并网系统谐波谐振模态分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4156-4164, 4295.
- [12] 舒万韬, 洪芦诚, 刘宁波, 等. 多逆变器并网谐振特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 5009-5019, 5298.
- [13] 唐振东, 杨洪耕, 马晓阳, 等. 偏远地区风电场的并网谐振现象分析[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1415-1421.
- [14] 胡海涛, 何正友, 钱澄浩, 等. 基于模态分析的全并联AT网动态谐波谐振研究[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 163-169.
- [15] 王守相, 王成山. 基于区间算法的配电网三相潮流计算模型[J]. 中国电机工程学报, 2002(2): 53-59.
- [16] 王成山, 王守相. 基于区间算法的配电网三相潮流计算及算例分析[J]. 中国电机工程学报, 2002(3): 59-63.
- [17] 韩亮, 王守相, 赵歌. 基于区间TOPSIS与遗传算法混合的分布式电源优化配置[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(24): 37-42.
- [18] 汪超群, 韦化, 鲍海波, 等. 基于区间不确定性的约束潮流[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 72-77.
- [19] 廖小兵, 刘开培, 张亚超, 等. 基于区间泰勒展开的不确定性潮流分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4): 750-758.
- [20] 伍文华, 周乐明, 陈燕东, 等. 序阻抗视角下虚拟同步发电机与传统并网逆变器的稳定性对比分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1411-1421.
- [21] 管雪帅. 直驱风电机组与SVG交互作用引发次/超同步振荡的分析与特性研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2019.
- [22] 于淼, 谢欢, 宋玮, 等. 风电汇集地区SVC控制方式对电压异常振荡影响因素分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 73-78.
- [23] 许津铭, 谢少军, 张斌峰. 分布式发电系统中LCL滤波并网逆变器电流控制研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4153-4166.
- [24] 曾正, 赵荣祥, 汤胜清, 等. 可再生能源分散接入用先进并网逆变器研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 1-12, 21.
- [25] 邱志平, 陈望寰, 周振平. 对称区间矩阵标准特征值问题的一种新算法[J]. 吉林工业大学学报, 1994(3): 62-66.

作者简介

洪语蔚(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源并网电能质量分析。

(收稿日期: 2022-02-12)