

近海风电场集群谐波谐振仿真分析与机理研究

唐 昕^{1,2}, 王楚通³, 王 楠⁴

(1. 国网嘉兴供电公司, 浙江 嘉兴 314000; 2. 上海工程技术大学, 上海 201600;

3. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071000; 4. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310000)

摘要: 随着海上风电从近海向深远海建设发展, 谐波谐振成为影响电网稳定的问题之一。分析了海上风电场谐波放大机理, 建立海上风电场谐波模型, 采用“频率扫描+模态分析+现场测量”的谐波谐振分析方法, 仿真验证了不同系统参数和风机工况对谐波谐振的影响, 对近海风电工程设计和并网发电工作有指导意义。

关键词: 近海风电; 谐波谐振; 谐波潮流

Simulation analysis and mechanism research on harmonic resonance of offshore wind farm cluster

TANG Xin^{1,2}, WANG Chutong³, WANG Nan⁴

(1. State Grid Jiaxing Power Supply Company, Jiaxing 314000, China; 2. Shanghai University of Engineering and Technology, Shanghai 201600, China; 3. School of Electrical and Electronic Engineering North China Electric Power University, Baoding 071000, China; 4. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China)

Abstract: With the development of offshore wind power from nearshore to deep offshore construction, harmonic resonance has become one of the problems affecting the stability of the power grid. The harmonic amplification mechanism of offshore wind farms was analyzed, and a harmonic model of offshore wind farms was established. The harmonic resonance analysis method of “frequency scanning+modal analysis+on-site measurement” was adopted to simulate and verify the influence of different system parameters and wind turbine operating conditions on harmonic resonance. This has guiding significance for offshore wind engineering design and grid connected power generation work.

Keywords: offshore wind power; harmonic resonance; harmonic power flow

0 引言

近海风电场一般指理论最低潮位以下5~50 m水深海域建设的风电场, 距离陆岸10~60 km不等, 是近几年海上风电开发的主要风电场。风电

机组大规模并网运行, 谐波和谐波谐振问题比较复杂, 对电网安全稳定运行产生较大的影响, 使电网对频率和电压波动的耐受能力减弱。当系统出现扰动时, 易引起较大范围的振荡, 影响电网运行的稳定性, 成为制约新型电力系统建设的主

要问题之一^[1]。近海风电受海域气候制约导致运行工况复杂,叠加长距离海缆和多个风电场交互影响等因素,使得风电场与电网之间的交互作用加强,产生新的稳定性问题。

开展近海风电场谐波谐振机理研究,建立海上风电场谐波机理模型,仿真风电场不等长度的海缆、开启不同数量的风机以及多个风电场对谐波谐振的影响,对近海风电工程设计和并网发电工作有指导意义。

1 海上风电模型

1.1 海上风电场拓扑结构

建立海上风电场典型拓扑结构,如图1所示。其中,节点1~4分别是风机35 kV并网节点、海上升压变压器35 kV侧、海上风电场220 kV母线和陆上计量站220 kV母线。

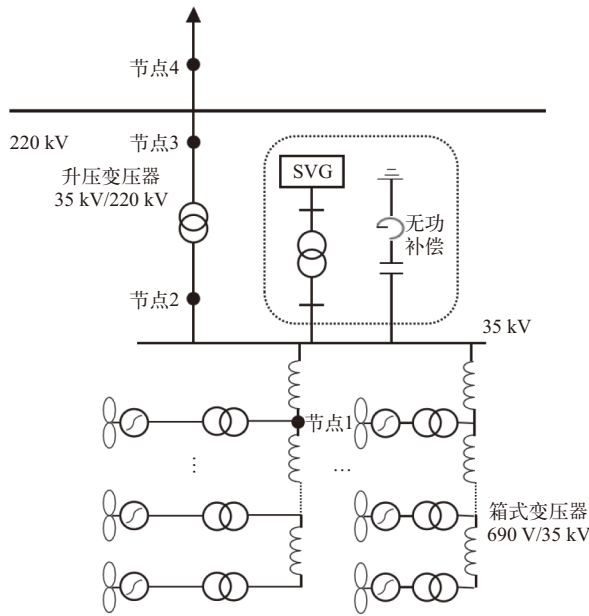


图1 海上风电场拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of offshore wind farm

开展海上风电场谐波谐振特性研究,需要建立海上风电场谐波模型^[2]。

1.2 双馈异步风电机组谐波模型

双馈异步风电机组谐波模型主要由背靠背电压源换流器和异步电动机组成,其中电压源换流器由网侧变换器(Grid-Side Converter, GSC)

和转子侧变换器(Rotor-Side Converter, RSC)构成。在构建模型时,可以将其等效为两个谐波电压源。双馈异步风电机组谐波模型如图2所示。

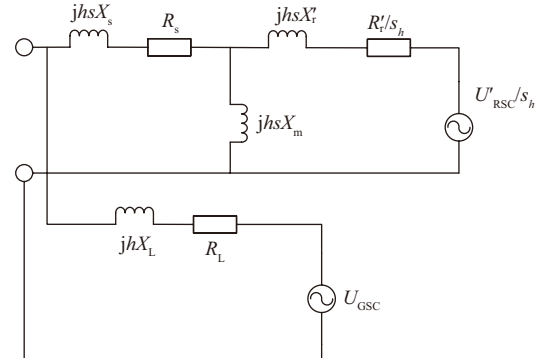


图2 双馈异步风电机组的谐波模型

Fig. 2 Harmonic model of doubly-fed asynchronous wind turbine

图2中, U_{GSC} 为网侧变换器谐波电压源; U'_{RSC} 为归算到定子侧的转子侧变换器谐波电压源; R_s 为定子电阻; R_L 、 X_L 分别为L型滤波器电阻和电抗; X_s 为基频下的定子漏电抗; X_m 为磁化电抗; R'_r 、 X'_r 分别为归算到定子侧的转子电阻和基频转子漏电抗; s 为电动机稳定运行下的基频转差率; s_h 为第 h 次谐波波下的谐波转差率。

1.3 变压器谐波模型

在电力系统中,变压器的电感性元件和系统中的电容性元件可以构成一个谐振回路,当谐振频率与谐波频率相匹配时,会导致谐波电流或电压显著增加。同时谐波,特别是低次谐波,能导致变压器磁芯饱和,增加变压器的非线性,导致产生更多高次谐波,使谐波问题更加突出。变压器的谐波模型可表示为

$$Z_{T,h} = R_T + jhX_T = \varepsilon \frac{U_{N,M}^2}{S_N} \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \varphi}} (1 + jh \tan \varphi) \quad (1)$$

式中, $U_{N,M}$ 、 S_N 分别为变压器低压侧额定电压和额定容量; ε 为单位短路阻抗; $\tan \varphi = X_T/R_T$ 。

在谐波频率下,式(1)可改写为

$$Z_{T,h} = \sqrt{h} R_T + jhX_T \quad (2)$$

1.4 电力电缆谐波模型

电力电缆具有固有的分布式电容性质,在交

流电系统中, 电缆的电容效应与系统中的电感相结合, 可能形成 LC 谐振电路。如果系统的谐振频率与某个谐波频率接近, 可能会导致该频率的谐波显著放大。在对电缆进行建模时, 需考虑到趋肤效应的影响, 并对电缆参数进行修正。

$$Z = R_{L-D}(0.187 + 0.532\sqrt{h}) + jhX_{L-D} \quad (3)$$

$$Y = jhX_{C-D} \quad (4)$$

式中, Z 、 Y 分别为电缆单位长度的阻抗和导纳; $(0.187 + 0.532\sqrt{h})$ 为趋肤效应修正参数; R_{L-D} 、 X_{L-D} 和 X_{C-D} 分别为电缆单位长度的电阻、电抗和对地电容。

电缆谐波模型可表示为

$$Z_{L,h} = Z_c \sinh(\gamma l) \quad (5)$$

$$Z_{C,h} = \frac{Z_c \sinh(\gamma l)}{2 \cosh(\gamma l) - 1} \quad (6)$$

式中, Z_c 为电缆特征阻抗, $Z_c = \sqrt{Z/Y}$; γ 为传播系数, $\gamma = \sqrt{ZY}$; l 为电缆长度。

1.5 静止无功发生器谐波模型

动态无功补偿设备具有响应速度快、谐波含量小等特点。风电场多采用动态无功补偿设备, 运用最广泛的是静止无功发生器 (Static Var Generator, SVG), 其数学表达式为

$$\begin{cases} L \frac{d}{dt} i_A + Ri_A = \frac{2S_A - S_B - S_C}{3} U_C - u_A \\ L \frac{d}{dt} i_B + Ri_B = \frac{2S_B - S_A - S_C}{3} U_C - u_B \\ L \frac{d}{dt} i_C + Ri_C = \frac{2S_C - S_A - S_B}{3} U_C - u_C \\ C \frac{d}{dt} U_C = -(S_A i_A + S_B i_B + S_C i_C) \end{cases} \quad (7)$$

式中, u 、 i 、 S 分别为相电压、相电流和上桥臂的开关函数; A、B、C为三个相别; R 、 L 分别为SVG出口平波电抗器电阻、电感; U_C 为电容电压。

1.6 电网侧谐波模型

海上风电场向公共电网注入大量谐波, 会受到电网背景谐波的影响, 电网侧与风电场的谐波交互作用, 造成更加严重的谐波问题。从海上风

电并网点看, 电网谐波模型为

$$Z_{sh} = jhX_s = jh \frac{U_0}{S} (U_{N1}/U_{N2})^2 \quad (8)$$

式中, U_0 为电网侧开路电压; U_{N1} 、 U_{N2} 分别为变压器高压侧、低压侧额定电压; S 为并网点短路容量。

2 海上风电场并网谐波放大机理

当电力系统中的感抗和容抗相近时, 易产生系统谐振, 在谐波频率附近的谐振即为谐波谐振。常见的谐波谐振分为串联谐振和并联谐振。在实际风电并网系统中, 串并联谐振往往不是独立出现的。分析串并联谐振的谐波电压和谐波电流的放大机理, 对于海上风力发电的设计、运行和运维具有重要意义。

2.1 串联谐振的谐波电压放大机理

电网背景谐波电压是产生海上风电系统串联谐振的重要因素, 在某次谐波频率下, 当海上电缆和陆上电缆参数与背景谐波电压相匹配时, 会引发串联谐振, 使系统谐波电压放大。串联谐振时, 由于系统等效阻抗在谐振点表现出低阻抗特性, 较小的谐波电压波动也会导致谐波电流较大的变化, 海上风电场串联谐振等效电路如图3所示。

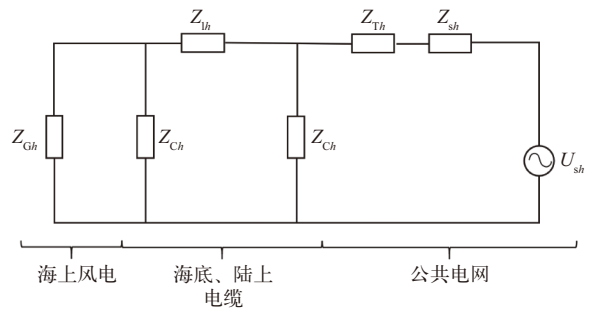


图3 海上风电场串联谐振等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of series resonance in offshore wind farms

图3中, Z_{Gh} 为海上风电场等效谐波阻抗; Z_{Lh} 、 Z_{Ch} 分别为海上电缆+陆上电缆的电抗和容抗; Z_{Th} 为变压器等效谐波阻抗; Z_{sh} 为系统谐波阻抗; U_{sh} 为公共电网背景谐波电压。由图3可知, 电网背景谐波电压和风电场并网点谐波电压

之间的关系为

$$\lambda = \left| \frac{U_{Gh}}{U_{sh}} \right| = \left| \frac{Z_{Th} + Z_{sh} + [(Z_{Gh} // Z_{Ch} + Z_{lh}) // Z_{Ch}]}{Z_{sh}} \right| \quad (9)$$

式中, λ 为谐波电压放大系数。当 $\lambda > 1$ 时, 表明风电场并网侧谐波电压大于电网背景谐波电压, 发生谐波电压放大现象; 当 $\lambda < 1$ 时, 表明背景谐波电压经陆上和海底电缆传递后逐渐衰减。

2.2 并联谐振的谐波电流放大机理

在某次谐波频率下, 当海上风电场谐波电流与电缆参数匹配时, 会发生并联谐振, 使谐波电流放大。并联谐振时, 由于系统等效阻抗在谐振点表现出高阻抗特性, 因此, 较小的谐波电流波动也会引起谐波电压较大范围变化。风电场并联谐振等效电路如图4所示。图4中, I_{Gh} 为海上风电场侧谐波电流; I_{sh} 为流入电网侧谐波电流。

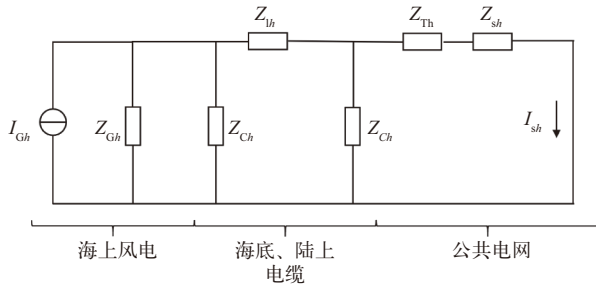


图4 海上风电场并联谐振等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of parallel resonance in offshore wind farms

流入电网侧谐波电流和风电场侧谐波电流之间的关系可表示为

$$\gamma = \left| \frac{I_{sh}}{I_{Gh}} \right| = \left| \frac{Z_{Gh}}{\{(Z_{sh} + Z_{Th}) // Z_{Ch}\} + Z_{lh} // Z_{Ch} // Z_{Gh}} \right| \quad (10)$$

式中, γ 为谐波电流放大系数。当 $\gamma > 1$ 时, 表明风电场注入系统谐波电流被放大, 发生谐波电流放大现象; $\gamma < 1$ 时, 表明风电场谐波电流经电缆传递后衰减。

根据以上分析可知, 谐波放大系数与谐波频率、电缆或架空线路长度、风机类型和数量等参数有关。

3 海上风电场谐波谐振模态分析

谐波谐振分析常用的方法有频率扫描法、模态分析法等。频率扫描法简单易操作, 缺点是不能确定风电并网系统中各节点对谐振的参与程度, 无法开展谐波谐振定量分析。模态分析法通过列写节点导纳矩阵, 采用特征值分解获得特征向量和对角特征值矩阵, 从而判断网络节点受激励是否产生谐振, 并确定谐振频率^[3]。模态灵敏度可以确定海上风电并网系统各元件参与谐振的程度, 采用模态分析和灵敏度分析, 可以弥补频率扫描法的不足, 本节介绍模态分析法和谐振灵敏度计算。

3.1 特征值分解

当系统发生频率为 f 的谐波谐振时, 在 f 频率下, 建立系统网络导纳矩阵, 系统节点的电压电流方程为

$$V_f = Y_f^{-1} I_f \quad (11)$$

式中, I_f 为 n 节点注入电流向量; V_f 为 n 节点电压向量; Y_f 为在 f 频率下的 n 节点导纳矩阵。

对导纳矩阵 Y_f 进行特征值分解, 公式为

$$Y_f = L \Lambda T \quad (12)$$

式中, Λ 为特征值对角矩阵; L 为左特征向量矩阵, T 为右特征向量。 $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m, \dots)$, $L = [l_1, l_2, \dots, l_m, \dots]$, $T = [t_1, t_2, \dots, t_m, \dots]^T$ 。

定义 $U_f = T V_f$ 为模态电压向量, $J_f = T I_f$ 为模态电流向量, 由式 (11)、式 (12) 可得

$$U_f = \Lambda^{-1} J \quad (13)$$

即

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_n^{-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \vdots \\ J_n \end{pmatrix} \quad (14)$$

式中, Λ^{-1} 为模态阻抗。

整理节点电压与模态电压的关系, 可得 $V_f = L U_f$, 即

$$\begin{pmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ \vdots \\ V_{fn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_{11} & l_{12} & \cdots & l_{1n} \\ l_{21} & l_{22} & \cdots & l_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{n1} & l_{n2} & \cdots & l_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{f1} \\ U_{f2} \\ \vdots \\ U_{fn} \end{pmatrix} \quad (15)$$

对任意模态 m 谐振, 模态电压 U_{fm} 远大于其他模态电压。式(15)化简为

$$\begin{pmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ \vdots \\ V_{fn} \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} l_{1m} \\ l_{2m} \\ \vdots \\ l_{nm} \end{pmatrix} U_{fm} \quad (16)$$

若 l_{bm} 的数值最大, 则母线 b 的节点电压最大, 母线 b 处可观察模态 m 谐振。同理, 若 $l_{mk} \approx 0$, 则模态电压 m 不会影响母线 k , 因此左特征向量矩阵中的各元素可反映各母线对某模态谐振的可观测性。

分析注入电流与模态电流之间的关系, 模态电流 J_{fm} 可表示为

$$\begin{pmatrix} J_{f1} \\ J_{f2} \\ \vdots \\ J_{fn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1n} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{n1} & t_{n2} & \cdots & t_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{f1} \\ I_{f2} \\ \vdots \\ I_{fn} \end{pmatrix} \quad (17)$$

对于模态 m , 有

$$J_{fm} = t_{m1}I_{f1} + t_{m2}I_{f2} + \cdots + t_{mn}I_{fn} \quad (18)$$

若 t_{mb} 的数值最大, 母线 b 上注入电流 I_b 对模态电流 J_{fm} 的贡献最大, 此时节点电压最大, 产生模态 m 谐振。同理, 若 $t_{mk} \approx 0$, 则母线 k 上注入电流不会造成模态 m 谐振, 因此右特征向量矩阵中的各元素可反映各母线注入电流后对某模态谐振的可激励性。

将可激励性和可观测性结合为一个指标, 以模态为例, 有

$$V_f = LA^{-1}TI_f \approx \lambda_m^{-1} \begin{pmatrix} l_{1m}t_{m1} & l_{1m}t_{m2} & \cdots & l_{1m}t_{mn} \\ l_{2m}t_{m1} & l_{2m}t_{m2} & \cdots & l_{2m}t_{mn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{nm}t_{m1} & l_{nm}t_{m2} & \cdots & l_{nm}t_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{f1} \\ I_{f2} \\ \vdots \\ I_{fn} \end{pmatrix} \quad (19)$$

式中, $l_{nm}t_{mn}$ 为参与因子 PF_{bm} , 表示对同一母线上的关键模式可激励性与可观测性的结合。参与

因子反映了谐波谐振可传导的距离, 参与因子越大, 该母线谐振的可能性越大。

3.2 模态灵敏度分析

系统发生谐振时, 观察参与因子 PF , 可了解节点谐振的激发程度, 但不能观测到元件是否参与谐波谐振以及具体的参与程度。模态灵敏度可以确定系统发生谐振时元件对谐振的参与程度。

模态特征值 λ_m 对矩阵 Y_j 中元素 Y_{ij} 的灵敏度为

$$\frac{\partial \lambda_m}{\partial Y_{ij}} = t_{mi} l_{jm} \quad (20)$$

式中, t_{mi} 为右特征向量矩阵第 m 行第 i 个元素; l_{jm} 为左特征向量矩阵第 m 行第 j 个元素。

模态特征值 λ_m 的灵敏度矩阵为

$$S_m = l_m t_m = \begin{pmatrix} * \\ * \\ l_{jm} \\ * \end{pmatrix} \begin{pmatrix} * & t_{mi} & * & * \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cdots & * & \cdots & \cdots \\ \cdots & t_{mi} l_{jm} & \cdots & \cdots \\ * & & * & * \\ \cdots & * & \cdots & \cdots \end{pmatrix} \quad (21)$$

将灵敏度矩阵 S_m 中第 b 行与第 b 列元素 $S_{m,bb}$ 和模态特征值 λ_m 的实虚部进行分解, 可得

$$\begin{cases} S_{m,bb} = S_r + jS_i \\ \lambda_m = \lambda_r + j\lambda_i \end{cases} \quad (22)$$

模态特征值幅值 $|\lambda_m|$ 对于母线 b 处并联元件的灵敏度指标为

$$\begin{cases} \frac{\partial |\lambda_m|}{\partial B} = \frac{S_r \lambda_i - S_i \lambda_r}{\sqrt{\lambda_r^2 + \lambda_i^2}} \\ \frac{\partial |\lambda_m|}{\partial G} = \frac{S_r \lambda_r - S_i \lambda_i}{\sqrt{\lambda_r^2 + \lambda_i^2}} \end{cases} \quad (23)$$

母线 i 和母线 j 之间的串联元件的模态灵敏度为

$$\begin{cases} \frac{\partial |\lambda_m|}{\partial X} = \frac{-2\mu RX + v(X^2 - R^2)}{(R^2 + X^2)^2} \\ \frac{\partial |\lambda_m|}{\partial R} = \frac{2vRX + \mu(X^2 - R^2)}{(R^2 + X^2)^2} \end{cases} \quad (24)$$

其中

$$\begin{cases} \mu = \partial |\lambda_m| / \partial G \\ v = \partial |\lambda_m| / \partial B \end{cases} \quad (25)$$

由式（23）计算可得

$$S_r+jS_i=S_{m,ii}+S_{m,jj}-S_{m,ij}-S_{m,ji}$$
 (26)

将灵敏度做标准化处理，使各元件的模态灵敏度具有可比性，公式为

$$\sigma_\alpha=\frac{\partial|\lambda_m|}{\partial\alpha}\bigg|_{\text{norm}}=\frac{\partial|\lambda_m|}{|\lambda_m|}\bigg/\frac{\partial\alpha}{\alpha}=\frac{\partial|\lambda_m|}{\partial\alpha}\frac{\alpha}{|\lambda_m|}$$
 (27)

式中， α 表示网络元件参数。当 $\sigma_\alpha>0$ 时，说明随着元件参数的增大， $|\lambda_m|$ 数值增大，模态阻抗幅值 $|\lambda_m^{-1}|$ 减小，可抑制谐振。当 $\sigma_\alpha<0$ 时， $|\lambda_m|$ 数值也对应增大，随之模态阻抗幅值 $|\lambda_m^{-1}|$ 减小，抑制谐振。通过调节 $|\sigma_\alpha|$ 最大的元件参数，可以在调节量最小的情况下抑制谐振。

4 仿真验证

4.1 海上风电场阻抗频率特性仿真分析

根据图1中的海上风电场拓扑结构以及海上风电并网系统等效参数，在ETAP软件建立海上风电场仿真模型，如图5所示。

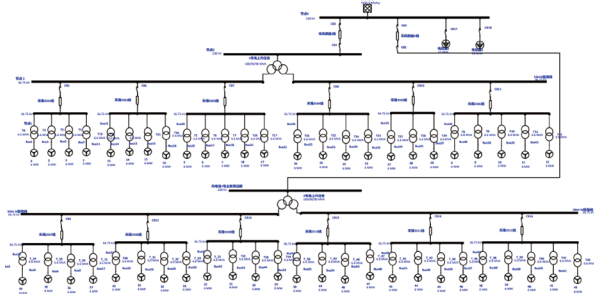


图5 海上风电场仿真模型
Fig. 5 Simulation model of offshore wind farm

对海上风电场各节点进行阻抗频率特性扫描，结果如图6所示。

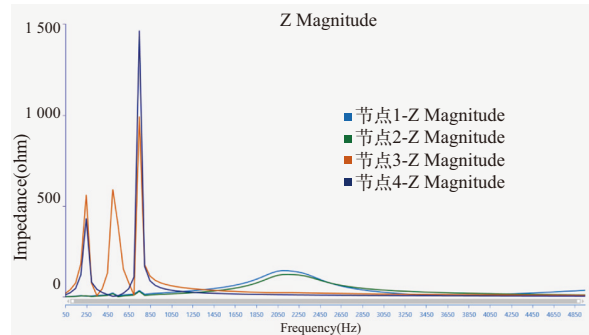


图6 风电场阻抗频率扫描
Fig. 6 Scanning of wind farm impedance frequency

海上风电场220 kV母线（节点3）和陆上计量站220 kV母线（节点4）的5次谐波阻抗较大，有并联谐振的可能性；海上风电35 kV母线（节点1）5次谐波阻抗较小，有串联谐振的可能性。风机停机待风时，海上风电场升压变压器及以下部分可视为开路，此时谐振次数为4.41次。当系统大方式运行时，谐振次数近似为5次。由于系统5次谐波电压含量较高，5次谐波阻抗较小，因此，5次谐波处串联放大的可能性较大。

4.2 海上风电场模态分析仿真计算

根据频率扫描分析可知，海上风电场存在4个谐波谐振点，对应4种谐振模式，谐振频率分别为230 Hz、530 Hz、750 Hz和2 160 Hz。应用模态理论验证4种谐振模式下的4个节点参与因子，结果见表1。

表1 4种谐振模式下4个节点参与因子
Tab. 1 Participation factors of four nodes under four resonance modes

节点 谐振频率/Hz	节点 1	节点 2	节点 3	节点 4
230	0.212 1	0.024 7	0.504 3	17.186 4
530	0.466 6	0.054 4	1.109 4	37.810 2
750	0.636 2	0.074 2	1.512 8	51.559 3
2 160	0.975 6	0.113 7	2.319 7	79.057 6

由表1可知，节点4在4种谐振模式下的参与因子最大，是谐振频率下的谐振中心，在节点4处更容易观测到4种谐振模式的谐波谐振现象，也是最容易激励谐波谐振的位置。

在4个节点布置电能质量在线监测装置，测试海上风电场并网后的谐波数据。从现场量测数据看，节点4的5次谐波明显放大，呈现谐振现象，印证了仿真结果。也可在4个节点分别布置电能质量在线监测装置，分析各节点的谐波数据。

因此，运用频率扫描可获得系统谐振阻抗和频率，通过模态分析进一步获取不同节点谐振参与程度的信息，基于模态分析结论确定开展现场量测节点，结合现场量测数据可印证上述分析方法的正确性。采用“频率扫描+模态分析+现场测

量”结合的方法,可提高海上风电并网系统谐波谐振分析的准确性。

4.3 海上风电场谐波潮流仿真分析

阻抗频率扫描不能量化海上风电场各种参数和风机工作状态对谐振的影响程度,需开展谐波潮流仿真分析。

(1) 风机数量对谐波谐振的影响

风机数量的变化,影响风电场内部35 kV连接海缆的数量和长度,但不影响220 kV输送海缆的长度,一定程度上改变了谐振点的位置。不同风机数量下的谐振仿真结果如图7所示,计算结论见表2。

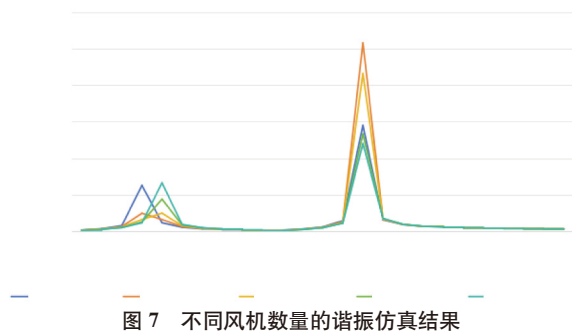


图7 不同风机数量的谐振仿真结果

表2 不同风机数量的谐振特性

Tab. 2 Resonance characteristics with different numbers of wind turbines

风机数量 / 台	第一次谐振		第二次谐振	
	频率 / Hz	幅值 / Ω	频率 / Hz	幅值 / Ω
0	250	626.01	750	1 448.34
20	250	242.557	750	2 580.61
35	250	243.886	750	2 160.23
50	200	435.937	750	1 331.22
65	200	659.888	750	1 198.29

由图7和表2可知,风电并网系统存在两个谐振点。当风机数量为35~65台时,即当风电场装机容量小于210 GW·h,谐振频率为250 Hz(5次谐波)。当风电场装机容量在300~390 MW之间时,谐振频率为200 Hz。当风电场全部停机时,风电场产生5次谐波谐振,此时谐振主要由背景谐波经海缆传导放大引起。风电机组数量增加,会放大谐振,使谐振频率降低。在高次谐波

下,风电场装机容量增加,谐振幅值衰减,但不会影响谐振频率。

综上,装机容量小于210 MW时,海上风电场易出现5次谐波谐振。风电场装机容量增加使高频谐振幅值衰减,但频率不变。因此,在海上风电场工程设计中,要考虑避开发生谐波谐振的频率点。

(2) 海缆长度对谐波谐振影响

由于220 kV海缆的电容和电感随电缆长度不同变化较大,对谐波放大的影响也较大,仿真主要考虑220 kV海缆,不同海缆长度下的谐振仿真结果如图8所示,计算结论见表3。

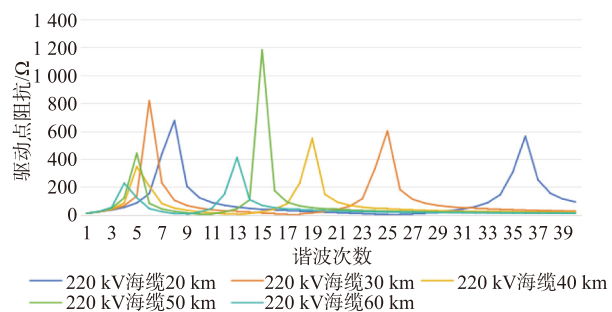


图8 不同海缆长度的谐振仿真结果

表3 不同海缆长度的谐振特性

Tab. 3 Resonance characteristics of different submarine cable lengths

220kV 海缆 长度 / km	第一次谐振		第二次谐振	
	频率 / Hz	幅值 / Ω	频率 / Hz	幅值 / Ω
20	200	667.413	1800	570.619
30	250	830.416	1250	583.465
40	250	348.097	950	533.989
50	300	435.937	750	1 331.22
60	400	228.583	650	403.588

由图8和表3可知,随着海缆长度增加,线路分布电容变大,发生谐波谐振的频率提高,谐振幅值呈现增大、衰减的重复波动趋势。当海缆长度为30 km时,系统谐振放大最明显,工程设计中应尽量避免。在高频谐振区域,海缆长度增加,谐振频率降低,谐振幅值同样呈现增大、衰减的重复波动趋势。

(3) 多个风电场谐波谐振互相影响

假设风电场集群有三个子风电场，装机容量分别是300 MW、300 MW和400 MW，仿真单个、两个和三个风电场并网的谐波谐振交互影响，结果如图9所示，计算结论见表4。

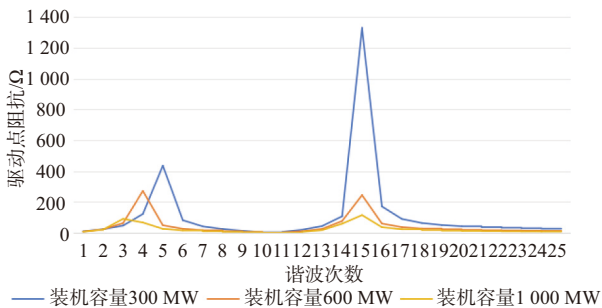


图 9 三个风电场的谐振仿真结果
Fig. 9 Resonance simulation results of three wind farms

表 4 不同风机数量的谐振特性

海上风电场 容量 /MW	第一次谐振		第二次谐振	
	频率 /Hz	幅值 /Ω	频率 /Hz	幅值 /Ω
1 000	150	90.801 2	750	115.388
600	200	271.613	750	244.854
300	250	435.937	750	1 331.22

由图9和表4可知，随着风电场数量和风电总装机容量增加，发生谐波谐振的频率逐渐降低，谐振幅值逐渐衰减。在高频区域，风电场数量和风电总装机容量增加，同样会使谐振幅值衰减，但频率不变。

5 结束语

随着海上风电从近海向深远海建设发展，谐波谐振成为影响电网稳定的问题之一。建立海上风电场谐波机理模型，采用“频率扫描+模态分析+现场测量”的谐波谐振分析方法，可提高海

上风电并网系统谐波谐振分析的准确性。

1) 在谐波谐振风电机组装机容量小于210 MW时，海上风电场易出现5次谐波谐振。风电场装机容量增加，使高频谐振幅值衰减，但频率不变。在海上风电场工程设计中，要考虑避开发生谐波谐振的频率点。

2) 随着海缆长度增加，谐振幅值呈现增大、衰减的重复波动趋势。当海缆长度为30 km时，系统谐振放大最明显，工程设计中应尽量避免。

3) 随着风电场数量和风电总装机容量增加，发生谐波谐振的频率逐渐降低，谐振幅值逐渐衰减。在高频区域，风电场数量和风电总装机容量增加，同样会使谐振幅值衰减，但频率不变。

参考文献

[1] 徐政, 金硯秋, 李斯迅, 等. 海上风电场交流并网谐波谐振放大机理分析与治理[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 85-91.

[2] 戎骏. 大规模风电并网的谐波谐振与谐波不稳定研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.

[3] 张逸, 郭俊煜, 邵振国. 考虑谐波严重程度长的时间尺度谐波责任划分方法[J/OL]. 电力自动化设备, 1-15[2023-08-31].

作者简介

唐昕（1980—），男，博士，正高级工程师，研究方向为海上风电。

王楚通（1994—），男，博士，硕士生导师，研究方向为电力系统储能。

（收稿日期：2025-03-05）