

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190014

## 基于阻抗测量的风电场谐振特性分析

锁军<sup>1</sup>, 袁丽丽<sup>2</sup>, 彭书涛<sup>1</sup>, 刘坤雄<sup>1</sup>, 覃智君<sup>2</sup>, 阳育德<sup>2</sup>

(1. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 陕西 西安 710100;

2. 广西电力系统最优化与节能技术重点实验室, 广西大学, 广西 南宁 530004)

**摘要:** 目前, 针对风电机组引起的谐振问题的研究分析方法比较复杂, 计算繁琐, 通常以含有线路串联补偿的模型为主, 不考虑换流器或简化换流器控制作用, 与实际系统相比存在较大误差。为计算简便, 减小误差, 提出一种基于谐波阻抗测量仿真分析的方法, 对风电系统模型进行谐振特性分析。该方法简单方便, 避免大规模数据的整理和计算, 可充分考虑风机换流器的影响, 减少简化系统带来的误差。以目前实际装机较多的双馈感应风机为研究对象, 以 PSCAD/EMTDC 为工具, 通过电磁暂态仿真, 建立典型双馈风电机组接入交流系统的模型以及西北含风电场某实际系统模型。用以上方法进行谐振特性分析, 结果表明, 双馈感应风电机组在运行过程中有可能表现为容性阻抗, 而交流电网呈感性, 故整个系统形成 RLC 谐振回路, 易引发谐振。

**关键词:** 双馈感应风机; PSCAD/EMTDC; Prony 分析; 阻抗扫描; 谐振特性

### Analysis of resonant characteristics of wind farm based on impedance measurement

SUO Jun<sup>1</sup>, YUAN Lili<sup>2</sup>, PENG Shutao<sup>1</sup>, LIU Kunxiong<sup>1</sup>, QIN Zhijun<sup>2</sup>, YANG Yude<sup>2</sup>

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China; 2. Key Laboratory of Guangxi Electric Power System Optimization and Energy-saving Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** At present, the research and analysis method of resonant problem caused by wind turbine is complex, the calculation is cumbersome, which is mainly related to the model of line series compensation, regardless of converter or simplified converter control, so there is large error with the actual system. In order to calculate the simplicity and reduce the error, a method based on harmonic impedance measurement simulation analysis is proposed in this paper to analyze the resonant characteristics of the wind power system model. The method is simple and convenient, and avoids the collation and calculation of large-scale data, which can fully consider the influence of wind converter and reduce the error caused by simplifying the system. Taking the doubly fed induction generator with more actual installed machine as the research object, the PSCAD/EMTDC is used as the tool, and through the electromagnetic transient simulation, the model of the typical doubly fed wind generator access AC system and a practical system model of the Northwest wind farm are established. The resonant characteristics are analyzed by the above methods, and the results show that the doubly fed induction generator may exhibit capacitive impedance in the course of operation, while the AC power grid is sensual, so the whole system forms an RLC resonant circuit, which is easy to trigger resonance.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51767001).

**Key words:** DFIG; PSCAD/EMTDC; Prony analysis; impedance scanning; resonance characteristic

## 0 引言

电力系统稳定性研究一直都极具挑战性, 而次同步振荡(Sub Synchronous Oscillation, SSO)问题是其中的研究重点之一。随着经济建设快速发展, 电

力系统的规模不断扩大, 结构日趋复杂, 次同步振荡问题已然成为威胁电力安全的重要因素之一<sup>[1-3]</sup>。传统的次同步振荡问题已经得到较为深入的研究, 21 世纪以来, 我国将光伏、风电等新能源的利用确定为战略性新兴产业。风电装机容量稳步上升, 电力系统中接入了大量的电力电子设备, 大规模风电场引发了新型次同步振荡问题<sup>[4-9]</sup>。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51767001)

根据国际大电网 2007 年发布的报告,风电机组动态模型可分为四类:恒速异步风力发电机模型,可变转子电阻的感应发电机模型,双馈感应风电机组模型和全整流型风力发电机组模型<sup>[10]</sup>。大型风电场风机数量较多,类型多样。因此,风电场与电网的相互作用而引起的谐振特性通常非常复杂。目前研究含风电系统主要分为双馈风机风电场经串补送出、直驱风机风电场接入弱交流系统和海上风电场经高压直流线路送出系统等<sup>[11-18]</sup>。

由目前研究可知,含风电系统引起次同步振荡的主要原因是线路中有串联补偿器或者其他容性阻抗。但 2015 年 7 月,新疆某地区在没有串补的情况下,风电场引发了近区汽轮机轴系扭振。随后,西北某电网开展了含新能源系统次同步振荡监测。在附近没有串补的情况下,监测到风电场出口含有大量次同步谐波分量<sup>[19-20]</sup>。该电网风电场主要包含恒速异步风力发电机、直驱风机和双馈感应风电机组,但大部分为双馈感应风电机组,故本文以双馈感应风电机组为主要对象,基于谐波阻抗测量方法对风电场谐振特性进行仿真分析。主要工作为对双馈感应风电机组进行建模,接入交流电网,利用基于谐波阻抗测量分析方法对风电场谐波阻抗进行分析,阐述其谐振特性,探讨该谐振对电网的危害和防范措施。

## 1 双馈感应风机建模

### 1.1 风机模型

双馈感应风机由绕线式感应发电机、风力机组组件、双 PWM 变换器及其控制系统组件构成,如图 1 所示。网侧变换器的控制目的是控制直流侧电压,转子侧控制的主要目标是通过一定的控制策略对转速进行控制,达到变速恒频,对电动机转速及有功、无功解耦控制<sup>[21-22]</sup>。

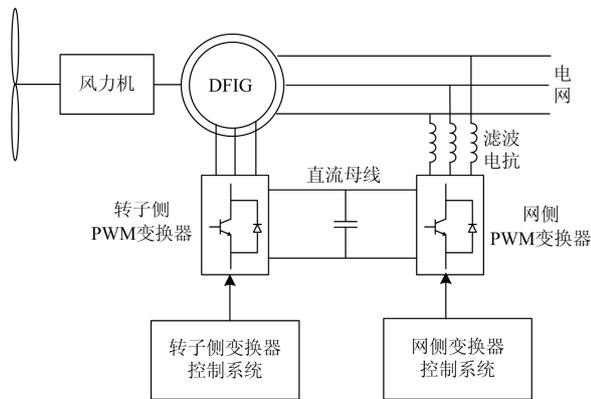


图 1 双馈感应风机结构图

Fig. 1 Structure diagram of DFIG

### 1.2 简单系统仿真

时域仿真采用图 2 所示的结构。以 PSCAD 提供的 Type 3 Wind Turbine Generators (WTG) 例程为基础<sup>[23-24]</sup>进行时域仿真。

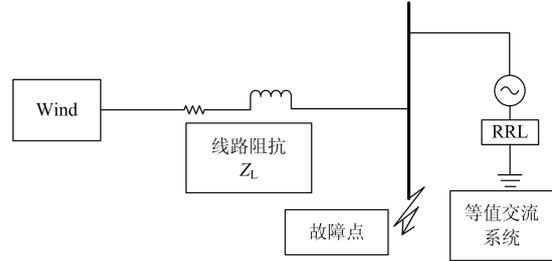


图 2 简单系统仿真结构图

Fig. 2 Simple system simulation structure diagram

图 2 所示简单系统结构,对双馈感应风机进行建模。该系统包含双馈感应风机、线路、功率缩放组件、故障组件和等值系统。发电机部分,采用绕线式感应电机模型。风力机切入风速为 4 m/s,切出风速为 25 m/s,额定风速为 10.5 m/s。为使分析过程简明清晰,假设风电场中风机类型、运行状态一致,在时域仿真中用缩放组件放大单台风机功率以模拟风电场。将单台风机的输出电流乘以风电场中的风机数,并通过电流源注入电力系统,功率缩放组件所带阻尼电感可用于保持仿真稳定性,根据系统稳定性进行调节。变流器直接使用模型库中的电力电子开关模型,采用 6 脉冲整流、逆变电路,基于 IGBT 半导体开关模块设置。等值系统为等效电压源,可调节网络短路比模拟系统的强弱。

## 2 谐振特性分析原理

### 2.1 次同步分析方法概述

目前,用于研究电力系统谐振的方法<sup>[25-26]</sup>主要可分为两个大类。一类方法用来初步判断电力系统是否会发生谐振以及确定哪些机组有谐振风险,即频率扫描法和机组作用系数法。分析所需原始数据不多,计算方法也较为简单。另一类方法相对能较精确地分析谐振的特性,即复转矩系数法和特征值分析法。该类方法需要系统的运行参数和元件数据,如发电机的轴系参数、直流输电系统控制器参数和新能源控制器参数等。由于在对实际系统进行计算时,系统中某些参数很难准确知道,并且在计算时需要整理大量的数据。因此,采用此类方法进行实际大系统的计算和分析难度较大。而时域仿真法不需要整理大量数据,也不用对换流器进行简化,通过对电力系统进行详细的仿真,确定各变量随时间的变化轨迹。但它淹没了系统谐振产生的原因以及

系统失稳的机理, 不能直接提供有关谐振稳定运行域的信息。所以结合时域仿真, 使用 Prony 辨识对仿真信号数据加以分析, 再进行谐波阻抗测量, 找出系统谐振的特性, 能简单和准确地分析系统谐振特性。

## 2.2 Prony 分析

### 2.2.1 Prony 分析法原理

Prony 分析法是一种用于模态参数识别的方法。由指数函数的线性组合来拟合采样数据, 从信号中分析出频率、振幅、相位和衰减因子等参数。该方法可以对时域仿真数据进行详细分析, 确定各变量的变化轨迹<sup>[27]</sup>。

将时域仿真信号数据进行 Prony 分析, 可求出信号的衰减因子、频率、振幅和初相分别为

$$\sigma_i = \ln|Z_i|/\Delta t \quad (1)$$

$$f_i = \arctan(\text{Im}(Z_i)/\text{Re}(Z_i))/2\pi\Delta t \quad (2)$$

$$A_i = |b_i| \quad (3)$$

$$\theta_i = \arctan(\text{Im}(b_i)/\text{Re}(b_i)) \quad (4)$$

其中, 衰减因子反映了系统对该振荡模态的阻尼大小, 为了表示振荡模态衰减的速度, 引入了阻尼比的概念, 它定义为

$$\xi = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + 4\pi^2 f^2}} \quad (5)$$

显然, 阻尼比越大, 振荡幅值衰减的速度越快, 阻尼比越小, 越容易引发振荡<sup>[28-28]</sup>。

### 2.2.2 谐振模式识别

不同的模式有不同的能量级, 计算每一种模式的能量并分类, 按照各振荡模式的能量进行排序, 便可甄别出系统的主要谐振模式。选取能量高并且模值大的模式, 该模式为谐振模式。对于系统谐振分析, 与阻尼比相关。阻尼比小于零的模式即相当于系统存在实部为正的实特征根, 系统是不稳定的, 阻尼比较小的系统也存在谐振风险, 需采取措施, 加强系统的阻尼。

## 2.3 阻抗测量谐振特性分析原理

通过以上 Prony 分析, 得到系统主要谐振频率。为了进一步研究谐振特性, 在时域仿真中, 进行谐波阻抗测量, 产生频域内阻抗矩阵, 然后将矩阵折叠成从接口点看进去的等效矩阵, 对仿真元件输入参数中指定的每个频率都将重复该操作, 即得出所求元件随频率变化的阻抗值。简单系统测量图如图 3 所示。在测量点 1 和 2 进行谐波阻抗测量, 可等效阻抗  $Z_1$  和  $Z_2$ 。

$$Z_1 = \frac{Z_s \times Z_g}{Z_s + Z_g} \quad (6)$$

$$Z_2 = \frac{(Z_s - Z_L) \times (Z_g + Z_L)}{Z_s + Z_g} \quad (7)$$

式中:  $Z_s$  为电网不同频率下的等效阻抗;  $Z_g$  为风机不同频率下的等效阻抗;  $Z_L$  为已知线路不同频率下的阻抗。根据公式和测量数据, 即可求出风机不同频率下的等效阻抗  $Z_g$ 。根据测量值可求出系统谐振频率, 如式(8)。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (8)$$

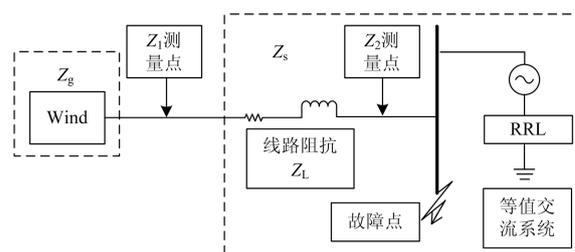


图 3 简单系统测量图

Fig. 3 Simple system measurement chart

## 3 风机谐振特性机理分析

### 3.1 Prony 辨识

为分析谐振产生的特性和机理, 对以上搭建的 PSCAD/EMTDC 简单系统模型进行测试。在模型运行稳定后, 给系统加入一个扰动。将风电场出口母线电流信号导出, 如图 4 所示。显然电流波形产生了畸变, 出现持续等幅振荡, 即存在谐振风险。

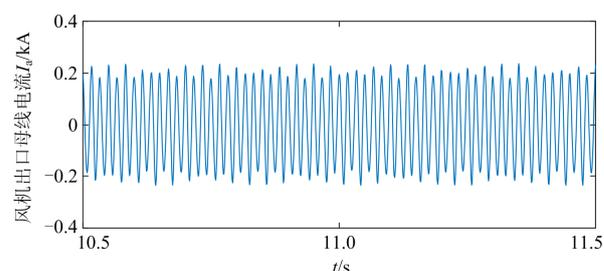


图 4 风电场出口母线电流

Fig. 4 Wind farm outlet busbar current

为求出谐振频率, 将图 4 所示电流信号导入 Matlab 中进行 Prony 拟合, 选择拟合阶数为 30 阶, 得到研究频域内各频率对应结果, 如图 5 所示。将分析数据导出, 可得到 30 个含谐波频率的振幅、衰减因子和能量, 根据式(5)求出阻尼比, 选取能量较高并且阻尼比较低的频率作为主要谐振频率, 如表 1 所示。

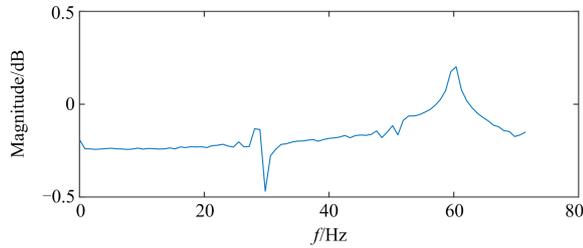


图 5 电流信号 Prony 30 阶近似模型分析

Fig. 5 Analysis of Prony 30 order approximation model of current signal

表 1 Prony 分析主要数据

Table 1 Main parameters of Prony analysis

主要频率/Hz	能量	阻尼比
14	0.000 009	0.157 254
20	0.000 001	0.007 006
28	0.000 750	0.004 037
34	0.000 610	0.249 444
38	0.000 017	0.034 759
43	0.000 031	0.044 394

将表 1 数据进行对比分析, 绘制图 6。根据谐振模式识别方法, 在振荡模式中具有高能量、低阻尼的为主要谐振模式。结合表 1 和图 6 可得, 该简单系统易引发谐振的频率为 20 Hz、28 Hz 和 43 Hz, 28 Hz 能量最高, 阻尼比最低, 故主导谐振频率为 28 Hz。

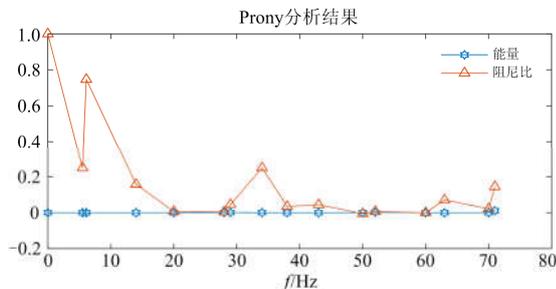


图 6 Prony 分析主要参数对比图

Fig. 6 Comparison diagram of main parameters of Prony analysis

### 3.2 谐波阻抗 $Z(f)$ 测量

为进一步分析风电机组与电网谐振机理, 采用时域仿真法, 分别在风电机组出口端 1 和 2 测量点进行了谐波阻抗测量, 对频率进行阻抗扫描, 得到了系统总等效阻抗  $Z_1$  和  $Z_2$ 。通过 Prony 分析, 表 1 所示主要谐振频率下  $Z_1$  和  $Z_2$  阻抗值如表 2 所示。 $Z_L$  为已知线路阻抗, 也可通过测量得到。

将测量所得  $Z_1$ 、 $Z_2$  和  $Z_L$  代入式(6)、式(7)中, 求出系统阻抗  $Z_s$  和风电机组的等效阻抗  $Z_g$ 。图 7 所

示为主导频率 28 Hz 附近风机等效阻抗图。表 3 列出 Prony 分析所得主要谐振频率下系统等效阻抗值  $Z_s$  和风机等效阻抗值  $Z_g$ , 以及其虚部(电抗)对应的等效电感和电容值。

表 2 Prony 主要频率下  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_L$  测量值

Table 2 Values of  $Z_1$ ,  $Z_2$  and  $Z_L$  measured at main frequencies

主要频率/Hz	$Z_1/\Omega$	$Z_2/\Omega$	$Z_L/\Omega$
14	2669.18 $\angle$ 88.35°	2669.62 $\angle$ 88.35°	0.43985 $\angle$ 89.35°
20	4986.91 $\angle$ 86.92°	4987.54 $\angle$ 86.92°	0.62834 $\angle$ 89.54°
28	16593.1 $\angle$ 79.57°	16593.9 $\angle$ 79.57°	0.87966 $\angle$ 89.67°
34	46232.5 $\angle$ -59.0°	46231.4 $\angle$ -59.0°	1.06815 $\angle$ 89.73°
38	15486.8 $\angle$ -79.8°	15485.7 $\angle$ -79.8°	1.19382 $\angle$ 89.76°
43	8653.08 $\angle$ -84.1°	8651.74 $\angle$ -84.1°	1.35089 $\angle$ 89.79°

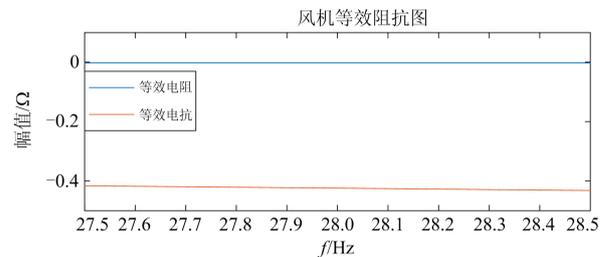


图 7 简单系统风机主导频率等效阻抗

Fig. 7 Simple system fan dominant frequency equivalent impedance

表 3 主要频率下等效阻抗

Table 3 Equivalent impedance under main frequencies

主要频率/Hz	$Z_s/\Omega$	等效电感 L/H	$Z_g/\Omega$	等效电容 C/F
14	0.0025+0.2042i	0.002 4	-0.0024-0.2042i	0.055 67
20	0.0025+0.2984i	0.002 4	-0.0024-0.2985i	0.026 66
28	0.0025+0.4241i	0.002 4	-0.0024-0.4241i	0.013 40
34	0.0025+0.5184i	0.002 4	-0.0024-0.5184i	0.009 03
38	0.0025+0.5812i	0.002 4	-0.0024-0.5811i	0.007 21
43	0.0025+0.6598i	0.002 4	-0.0024-0.6597i	0.005 61

根据表 3 数据可知, 不同频率下系统等效电感不变, 而风机等效电容大小随频率变化。显然, 风电机组为动态元件, 在不同频率下, 其控制器表现特性也不同, 所以等效电容大小不同。但是在测量频率范围内, 风电机组等效电抗均为负值, 呈现容性。该系统谐振主导频率为 28 Hz, 测量该频率下系统等效电感值为 0.002 4 H, 风电机组等效电抗为 -0.424 1  $\Omega$ , 计算出该频率下的电容为 0.013 40 F。此时系统形成 RLC 谐振回路, 谐振频率  $f=27.53$  Hz, 即接近主导频率 28 Hz, 易引发谐振。

显然, 动态风机可以等效为一个负阻抗, 即  $R<0, X<0$ 。即风机动态特性表现为负电阻和电容。

而交流电网一般呈现感性,形成 RLC 谐振回路,易引发次同步振荡。

## 4 西北某实际系统算例

### 4.1 西北某实际系统仿真

我国西北地区风力资源丰富,是大型风电基地,其部分含风电电网结构如图 8 所示。

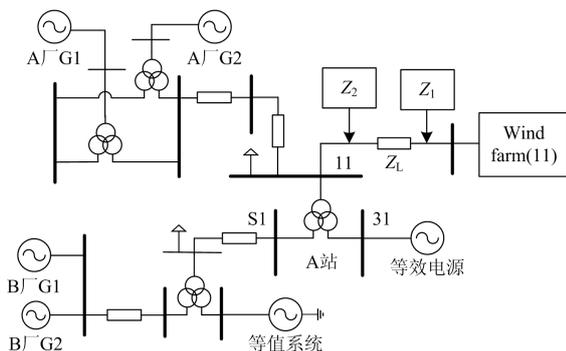


图 8 西北某实际电网仿真结构图

Fig. 8 Simulation structure diagram of a real power network in northwest China

该系统以西北某电网为基础,对大规模风电接入实际交流电网进行仿真。其中包含 11 个风电场、风电场近区 4 台汽轮发电机组以及相关交流网络。该系统包含大规模风电,从变电站 A 接入系统。各机组出力如表 4 所示。

表 4 西北某电网数据

Table 4 Data of a power grid in northwest China

机组	出力/MW
风电	602.8+j150.3
A 厂 G1/G2	12.00+j6.620
B 厂 G1	500.0+j300.0
B 厂 G2	600.0+j300.0

### 4.2 西北某实际系统 Prony 分析

根据电网结构和元件参数在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 8 所示模型。在模型运行稳定后,给系统加入一个扰动。大规模风电场于变电站 A 并入电网,其母线电流波形如图 9 所示。观察电流波形存在明显畸变,出现持续等幅振荡,有次同步谐振风险。

将大规模风电集聚点母线电流信号进行 Prony 分析,分析方法与简单系统类似。首先进行 Prony 拟合,再导出相应数据,计算出谐波频率阻尼比。分析结果如图 10 和表 5 所示。

由表 5 能量和阻尼比数据可绘制图 11 所示分析结果。根据结果进行对比分析,选取高能量、低阻尼比的振荡模式作为主要谐振模式。该系统易引发

谐振的频率为 10 Hz、21 Hz、25 Hz、34 Hz 和 39 Hz,其中 25 Hz 时能量最高,阻尼比较低,故主导频率为 25 Hz。

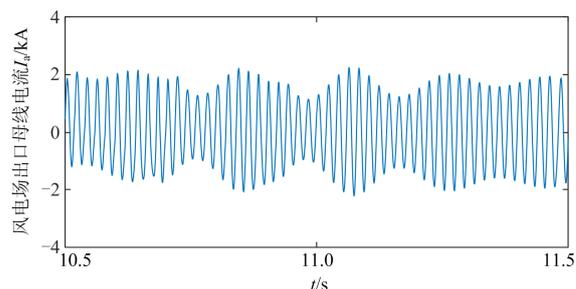


图 9 风电场出口母线电流

Fig. 9 Wind farm outlet busbar current

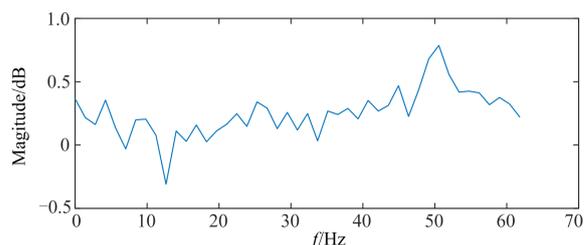


图 10 电流信号 Prony 30 阶近似模型分析

Fig. 10 Analysis of Prony 30 order approximation model of current signal

表 5 Prony 分析主要数据

Table 5 Main parameters of Prony analysis

主要频率/Hz	能量	阻尼比
10	0.027 000	0.017 306
16	0.041 000	0.047 716
21	0.160 000	0.017 437
25	0.660 000	0.019 741
34	0.029 000	0.020 603
39	0.110 000	0.018 778

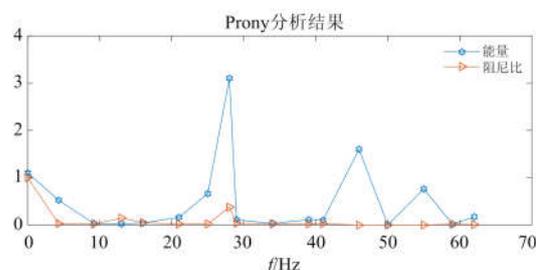


图 11 Prony 分析主要参数对比图

Fig. 11 Comparison chart of main parameters of Prony analysis

### 4.3 西北某实际系统谐波阻抗 $Z(f)$ 测量

如图 8 所示,在风电场出口端加设测量点进行

了谐波阻抗测量,得到了系统总等效阻抗  $Z_1$ 、 $Z_2$ 。再对已知线路进行测量,得到已知线路阻抗  $Z_L$ ,测量值如表 6 所示。

表 6 Prony 主要频率下  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_L$  测量值

Table 6 Values of  $Z_1$ ,  $Z_2$  and  $Z_L$  measured at Prony main frequencies

主要频率/Hz	$Z_1/\Omega$	$Z_2/\Omega$	$Z_L/\Omega$
10	2.09144∠81.35°	2.14683∠82.07°	0.43985∠89.35°
21	4.33796∠85.76°	4.46277∠86.12°	0.62834∠89.54°
25	5.36388∠86.54°	5.09668∠86.59°	0.87966∠89.67°
34	7.00719∠87.29°	7.21183∠87.53°	1.06815∠89.73°
39	8.03490∠87.59°	8.27007∠87.81°	1.19382∠89.76°

根据式(6)和式(7),分别求出系统等效阻抗  $Z_s$ 、风电场的等效阻抗  $Z_g$ ,计算结果如表 7 所示。主导谐振频率为 25 Hz 下的风电场等效阻抗结果显示如图 12 所示。

表 7 主要频率下等效阻抗

Table 7 Equivalent impedance under main frequencies

主要频率/Hz	$Z_s/\Omega$	等效电感 L/H	$Z_g/\Omega$	等效电容 C/F
10	0.0037+0.1352i	0.002 3	-0.0024-0.1456i	0.109 28
21	0.0037+0.3001i	0.002 3	-0.0024-0.3236i	0.023 41
25	0.0037+0.3601i	0.002 3	-0.0024-0.3884i	0.016 40
34	0.0037+0.4042i	0.002 3	-0.0024-0.5340i	0.008 77
39	0.0037+0.4952i	0.002 3	-0.0024-0.6149i	0.006 60

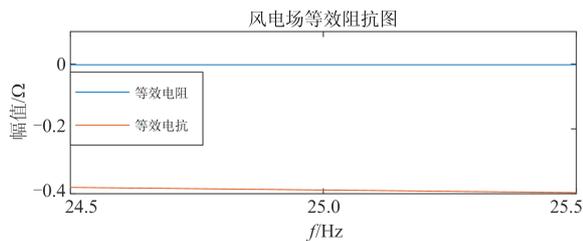


图 12 主导频率等效阻抗

Fig. 12 Equivalent impedance under dominant frequencies

对风电场进行谐波阻抗测量,得出等效电抗均为负值。主导频率为 25 Hz 下,系统等效电感为 0.002 3 H,风电场等效电抗值为-0.388 4 Ω,在次同步谐振频率下风电场可以看作容性元件,电容值为 0.016 40 F。与电网形成 RLC 谐振回路,谐振频率  $f=25.91$  Hz,接近 Prony 分析主导谐振频率 25 Hz,存在谐振风险。

根据西北某实际电网运行数据、元件参数,在 PSCAD 上搭建了较为接近实际系统的仿真模型。通过对系统部分结构分析可知,该电网含大规模风电,电流中有谐波分量。结合基于谐波阻抗测量方法的

风电场谐振特性仿真分析,该电网风电场的动态特性表现为容性,电网呈现感性,故形成谐振回路,存在谐振风险。测量所得主导谐振频率为 25 Hz,由于实际系统中含有风机类型较多,结构更为复杂,在实际运行中可能存在多模态谐振,即多个谐振频率,应采取有效预防措施。

## 5 结论

随着风电机组大规模装机并网,引发电力系统新型谐振,用现有的方法分析谐振特性较为复杂和困难。本文采用提出的基于谐波阻抗测量的风电场谐振特性仿真分析法,对风电机组与交流电网相互作用引起的谐振进行分析,简单有效,结果准确。在 PSCAD 平台上搭建了双馈感应风机接入等效无穷大系统以及大规模风电场接入西北某电网实际系统两个模型。通过电磁暂态仿真,将时域仿真所得风电机组出口电流数据导入 Matlab 中,进行 Prony 分析,得到易引发谐振的频率,根据能量和阻尼比确定谐振的主导频率。再通过谐波阻抗测量风电机组的等值阻抗。结果表明双馈感应风机等值阻抗为负,呈容性,交流电网等值阻抗为正,呈感性。系统形成 RLC 谐振回路,其谐振频率为  $f$ ,其中:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

其测量计算谐振频率值与 Prony 分析所得主导频率相等,验证了方法的准确性。双馈感应风机引发的新型谐振对风机、邻近汽轮机组和电网都有很大危害,而为何双馈感应风机呈现为容性,以及面对由风电机组引起的新型谐振,应采取怎样的防范措施,将是下一步研究的内容。

## 参考文献

- [1] 肖湘宁,郭春林,高本峰,等. 电力系统次同步振荡及其抑制方法[M]. 北京:机械工业出版社,2014.
- [2] WANG Xiaolu, LI Nana, SUN Wei, et al. Quantitative analysis of distributed and centralized development of renewable energy[J]. Global Energy Interconnection, 2018, 1(5): 576-584.
- [3] LI Rui, YU Lujie, XU Lie. Operation of offshore wind farms connected with DRU-HVDC transmission systems with special consideration of faults[J]. Global Energy Interconnection, 2018, 1(5): 608-617.
- [4] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 可再生能源中长期规划[EB/OL]. [2011-03-18]. National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Medium and long term planning for renewable energy[EB/OL]. [2011-03-18].

- [5] 张超, 王维庆, 王海云, 等. 风火打捆外送系统 220 kV 电网次同步振荡监控策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 138-144.  
ZHANG Chao, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Study on the monitoring strategy of sub-synchronous oscillation of 220 kV power grid in wind and fire bundled delivery system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 138-144.
- [6] 肖湘宁, 罗超, 廖坤玉. 新能源电力系统次同步振荡问题研究综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 85-97.  
XIAO Xiangning, LUO Chao, LIAO Kunyu. Review of the research on subsynchronous oscillation issues in electric power system with renewable energy sources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 85-97.
- [7] 徐兴发, 陈志峰, 王智东, 等. 缺储能风光微电网孤岛初期幅频特性[J]. 广东电力, 2019, 32(5): 22-28.  
XU Xingfa, CHEN Zhifeng, WANG Zhidong, et al. Initial amplitude-frequency characteristics of isolated island in lack of energy storage microgrid[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(5): 22-28.
- [8] 陈华, 王国平. 萤火虫图距离矩阵的两个最大特征值和的下界[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 37-44.  
CHEN Hua, WANG Guoping. The lower bound of sum of two largest eigenvalues of the distance matrix of firefly graph[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2018, 46(1): 37-44.
- [9] 饶日晔, 张亚丽, 叶林. 直驱式永磁同步风电机组的风电场降阶等值模型[J]. 广东电力, 2019, 32(6): 9-17.  
RAO Risheng, ZHANG Yali, YE Lin. Equivalent model of order reduction of wind power plant with DD-PMSG[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(6): 9-17.
- [10] 陈武晖, 王龙, 谭伦农, 等. WECC 风力发电机组/场通用动态模型研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(3): 738-750.  
CHEN Wuhui, WANG Long, TAN Lunnong, et al. Recent progress of developing WECC generic models of wind turbine generators/plants for dynamic simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3): 738-750.
- [11] 杨悦, 李国庆. 基于 VSC-HVDC 的海上风电小干扰稳定控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(12): 101-110.  
YANG Yue, LI Guoqing. The small signal stability control of offshore wind farm based on VSC-HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(12): 101-110.
- [12] 朱玲, 许翔, 侯玉强, 等. 基于宽频带转子附加阻尼的双馈型风机次同步振荡抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 37-42.  
ZHU Ling, XU Xiang, HOU Yuqiang, et al. A suppression strategy for DFIG subsynchronous oscillation based on broadband rotor additional damping[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 37-42.
- [13] 黄耀, 王田西, 陈昆明, 等. 双馈风电场次同步相互作用的机理仿真验证与实用抑制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2364-2369.  
WANG Yao, WANG Tianxi, CHEN Kunming, et al. SSI mechanism simulation validation and practical mitigation strategy of DFIG-based wind farm[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2364-2369.
- [14] 陈斐泓, 杨健维, 廖凯, 等. 基于频率扫描的双馈风电机组次同步控制相互作用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 84-91.  
CHEN Feihong, YANG Jianwei, LIAO Kai, et al. Sub-synchronous control interaction analysis in doubly-fed induction generator based on frequency scanning[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 84-91.
- [15] 李景一, 毕天姝, 丁钊, 等. 直驱风机变流控制系统对次同步频率分量的响应机理研究[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1734-1740.  
LI Jingyi, BI Tianshu, DING Zhao, et al. Study on response characteristics of grid converter control system of permanent magnet synchronous generators (PMSG) to subsynchronous frequency component[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1734-1740.
- [16] 高本峰, 刘晋, 李忍, 等. 风电机组的次同步控制相互作用研究综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 154-161.  
GAO Benfeng, LIU Jin, LI Ren, et al. Studies of sub-synchronous control interaction in wind turbine generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 154-161.
- [17] 高金辉, 朱迎正. 基于新电源模型的动力锂电池荷电状态估计研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 58-62.  
GAO Jinhui, ZHU Yingzheng. Study on state estimation of power lithium battery based on new power supply model[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2019, 47(1): 58-62.
- [18] 方力, 潘学萍, 鞠平. SVC 对双馈风电场次同步振荡影响及抑制策略[J]. 广东电力, 2019, 32(3): 52-58.  
FANG Li, PAN Xueping, JU Ping. Impact of SVC on sub-synchronous oscillation of DFIG-based wind farms and suppression strategy[J]. Guangdong Electric Power,

- 2019, 32(3): 52-58.
- [19] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 直驱风机风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡的机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2366-2372.
- XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2366-2372.
- [20] 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.
- CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-27.
- [21] LIU Huakun, XIE Xiaorong, ZHANG Chuanyu. Quantitative SSR analysis of series-compensated DFIG-based wind farm using aggregated RLC circuit model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 9(3): 75-84.
- [22] 李欣然, 马亚辉, 曹一家, 等. 一种双馈式风力发电系统的等效模型[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 210-217.
- LI Xinran, MA Yahui, CAO Yijia, et al. An equivalent model of doubly-fed wind generation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 210-217.
- [23] PSCAD. Type 3 wind turbine generators[EB/OL]. [2017-07-05]. <https://hvdc.ca/knowledge-base/read,article/496/type-3-wind-turbine-generators-wtg-for-pscad-v46>.
- [24] CLARK K, MILLER N W, SANCHEZ-GASCA J J. Modeling of GE wind turbine-generators for grid studies[M]. 2010.
- [25] 程时杰, 曹一家, 江全元. 电力系统次同步振荡的理论与分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [26] 文劲宇, 孙海顺, 程时杰. 电力系统的次同步振荡问题[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(12): 1-7.
- WEN Jingyu, SUN Haishun, CHENG Shijie. Subsynchronous oscillation in electric power systems[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(12): 1-7.
- [27] 刘巍. Prony 分析在电力系统低频振荡仿真中的应用[J]. 电力学报, 2011, 26(1): 17-28.
- LIU Wei. The application of Prony analysis for power system low frequency oscillation simulation[J]. Journal of Electric Power, 2011, 26(1): 17-28.
- [28] 王海宁, 李文娜, 陈东超, 等. 基于时域仿真法和 Prony 算法的次同步振荡分析[J]. 研究与分析, 2011, 8(1): 33-36.
- WANG Haining, LI Wenna, CHEN Dongchao, et al. Analysis on subsynchronous oscillation based on time domain simulation and Prony algorithm[J]. Research and Analysis, 2011, 8(1): 33-36.
- [29] 伍凌云, 李兴源, 孙衢, 等. 基于 Prony 辨识的复杂交流系统次同步振荡特性分析[J]. 四川大学学报, 2008, 40(3): 155-160.
- WU Lingyun, LI Xingyuan, SUN Qu, et al. Subsynchronous oscillation analysis based on Prony identification method[J]. Journal of Sichuan University, 2008, 40(3): 155-160.

收稿日期: 2019-01-04; 修回日期: 2019-06-25

作者简介:

锁军(1974—), 男, 硕士, 教授级高工, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: powersuo@163.com

袁丽丽(1994—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统暂态分析、新能源建模仿真等。E-mail: 604463054@qq.com

(编辑 魏小丽)