

# Impedance Modeling and Resonance Analysis of Grid-Connected Wind Turbine Group

Min Zhang<sup>1</sup>, Qiuyu Chen<sup>2</sup>, Jiajia Xu<sup>3</sup>, Da Lei<sup>1</sup>, Jinhao Wang<sup>1</sup>, Weiwei Yang<sup>1</sup>, Long Xu<sup>1</sup>, Shengwen Li<sup>1</sup>, Huipeng Li<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan Shanxi

<sup>2</sup>State Grid Chengde Electric Power Company, Chengde Hebei

<sup>3</sup>Wuxi Electric Power Company, Wuxi Jiangsu

Email: mevisan@126.com

Received: Feb. 7<sup>th</sup>, 2017; accepted: Feb. 25<sup>th</sup>, 2017; published: Feb. 28<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

The harmonic resonance of wind power grid is an important reason leading to the resonance of global grid-connected system. It is a potential threat to the stable operation of the power system. Based on the grid-connected resonance principle of wind turbine generator, the grid-connected inverter impedance model is proposed to analyze the resonance of grid-connected wind turbine group. An actual wind farm model and parameters are modeled in MATLAB to calculate the resonance of grid-connected wind turbine group. The impact of wind turbine units number and output power to the resonant characteristics can be analyzed. The correctness of theoretical analysis and effectiveness of the resonance analysis model is supported by the experimental results. It has a certain guiding significance to resonance analysis of running wind turbines group and grid-connected inverter design.

## Keywords

Wind Turbines, Grid-Connected Inverter, Output Impedance, System Resonance

---

## 并网风机群阻抗建模及系统谐振分析

张敏<sup>1</sup>, 陈秋宇<sup>2</sup>, 许佳佳<sup>3</sup>, 雷达<sup>1</sup>, 王金浩<sup>1</sup>, 杨尉薇<sup>1</sup>, 徐龙<sup>1</sup>, 李胜文<sup>1</sup>, 李慧蓬<sup>1</sup>

<sup>1</sup>国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西 太原

<sup>2</sup>国网承德供电公司, 河北 承德

<sup>3</sup>无锡市供电公司, 江苏 无锡

Email: mevisan@126.com

收稿日期：2017年2月7日；录用日期：2017年2月25日；发布日期：2017年2月28日

## 摘要

风电并网系统的谐波谐振是导致全局并网系统谐振发生的重要原因，是电力系统稳定运行的潜在威胁。基于风电机组并网谐振技术原理，从阻抗角度对并网逆变器进行建模，提出并网风机群系统谐振分析方法。以实际风电场模型及参数为实例，通过MATLAB编程仿真，实现风机群系统谐振情况计算，分析风机并网台数、风机输出功率对谐振特性的影响。仿真计算验证了理论分析的正确性与谐振分析模型的有效性，对实际运行时风机群组的谐振问题分析和并网逆变器设计具有指导意义。

## 关键词

风力发电机，并网逆变器，输出阻抗，系统谐振

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着并网电站容量的不断扩大，为了实现并网逆变器容量的优化配置，越来越多风电场采用了多逆变器并联入网的系统结构。而在这种多逆变器系统中，单个并网逆变器大都采用无隔离变压器的拓扑结构[1]，且一般采用LCL滤波器[2] [3]。随着并网发电系统穿透率的提升，公共连接点(points of common connection, PCC)阻抗的变化会使PCC处的电压对功率波动更加敏感[4]，而PCC处的电压波动又可能导致局部逆变器并网系统的谐振，这一局部逆变器并网系统的谐振又可能进一步导致全局并网系统谐振的发生[5] [6]。

由于实际电网不同程度地被谐波污染，加上电网本身存在阻抗，所以按理想电网设计的并网逆变器连接到实际电网下运行时，并网电流谐波畸变会加大，严重时甚至无法满足谐波标准。忽略电网阻抗，采用电网电压前馈控制[7]、比例谐振(proportional resonant, PR)控制[8]或重复控制[9]能够有效抑制电网谐波对单个逆变器并网电流质量的影响。由于逆变器侧和网侧谐波的存在，多逆变器系统与电网在PCC处形成的分布式阻抗网络必然会受到谐波源激励而发生交互作用，这对系统的稳定运行是一个潜在威胁。因此，从阻抗角度对并网逆变器进行建模，是从源头分析谐波交互问题的最有效方法。

## 2. 风机并网谐振原理

串联谐振发生在容性电抗和感性电抗相等的串联RLC电路中，这种情况下，电路的阻抗很小，较小的激励电压就能产生巨大的电流。并联谐振电路发生在具有感性电抗和容性电抗相等的并联RLC电路中，这种情况下电路导纳很小，较小的激励电流就能产生较大的电压。

风电并网系统的谐波谐振由谐振网络和激励源两者共同决定。一方面，分布式风电并网逆变器接入的是相对薄弱的电网末端，可能隐含各种串并联谐振回路。另一方面，并网逆变器是典型的电力电子开关设备，逆变器产生的谐波也可导致电网谐振。

同时，逆变器谐波电流与电网谐波电压存在着交互作用，这会加剧并网电流谐波畸变，导致并网系

统发生振荡，甚至引发系统不稳定而无法正常运行。因此，为能够从根源对谐振现象进行分析，本文基于并网逆变器和电网构成的等效阻抗网络，对谐振现象进行分析。

### 3. 并网风机群阻抗建模

#### 3.1. 逆变器理想模型

在风机并网逆变器的稳态模型的基础上，以两台逆变器并联为例，构建逆变器并联等效电路，为后续风机群阻抗建模提出基础研究。两台逆变器并联等效电路如图 1 所示。

通过对死区时间形成的误差电压[10]进行傅里叶分解可得到谐波电压，即为逆变器输出的低次谐波电压：

$$\dot{U}_{inv, nL} = \frac{8f_c t_d U_{dc}}{n\pi} \sin[n(\omega t - \varphi)] \quad (1)$$

式中： $f_c$  为载波频率； $t_d$  为死区时间； $U_{dc}$  为直流母线电压； $\varphi$  为调制波初相角； $n = 5, 7, 9, \dots$ 。

由式(1)可以看出，单次谐波电压幅值在开关频率及死区时间都确定的情况下，与直流侧电压值成正比。

#### 3.2. 并网逆变器输出阻抗模型

研究并网逆变的输出阻抗模型是谐振分析的基础。以基于功率开关器件模型的 LCL 单相并网逆变器双环控制为例进行输出阻抗建模，当开关频率远远高于电网基波频率时，并忽略直流母线电压波动及开关频率以上的高次谐波，通过对功率器件开关状态在一个开关周期内进行平均运算，模型可等效为图 2，称为平均模型。

图中： $u_r$  为调制信号； $G_{inv}$  为脉宽调制(pulse width modulation, PWM)逆变桥线性增益； $i_{gref}$  和  $i_{cref}$  分别为并网电流和电容电流给定值； $G_{ig}(s)$  为外环并网电流调节器的传递函数，采用比例积分控制； $G_{ic}(s)$  为内环滤波电容电流调节器的传递函数，采用简单的比例控制。

根据谐振机理分析，可化简为诺顿等效电路，实现并网模式下逆变器的输出阻抗建模。根据诺顿原理，就并网逆变器外部特性而言，电流源  $i_0$  为诺顿等效电路的输出端短路电流，输出阻抗  $Z_0$  为诺顿等效电路内所有独立源不作用时的输出端等效电阻，因此求  $Z_0(s)$  时，可令  $i_0(s) = 0$ ，即令并网电流给定值  $i_{gref}$  为零，所得逆变器输出阻抗为：

$$\begin{aligned} Z_0(s) &= \frac{u_0}{-i_g} \Big|_{i_{gref}=0} \\ &= \frac{s^3 L_1 L_2 C + s^2 G_{ic} L_2 C + s L_1 + s L_2 + G_{ig} G_{ic} G_{inv}}{s^2 L_1 C + s G_{ic} G_{inv} + 1} \end{aligned} \quad (2)$$

求  $i_0(s)$  时，可令  $u_0 = 0$ ，所得电流源为：

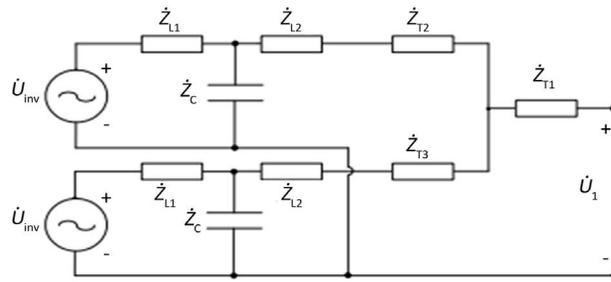
$$\begin{aligned} i_0(s) &= i_{gref} G_0(s) \Big|_{u_0=0} \\ &= i_{gref} \cdot \frac{G_{ig} G_{ic} G_{inv}}{s^3 L_1 L_2 C + s^2 G_{ic} G_{inv} L_2 C + s L_1 + s L_2 + G_{ig} G_{ic} G_{inv}} \end{aligned} \quad (3)$$

根据谐振机理分析，可实现并网模式下逆变器的输出阻抗建模，如图 3 所示。

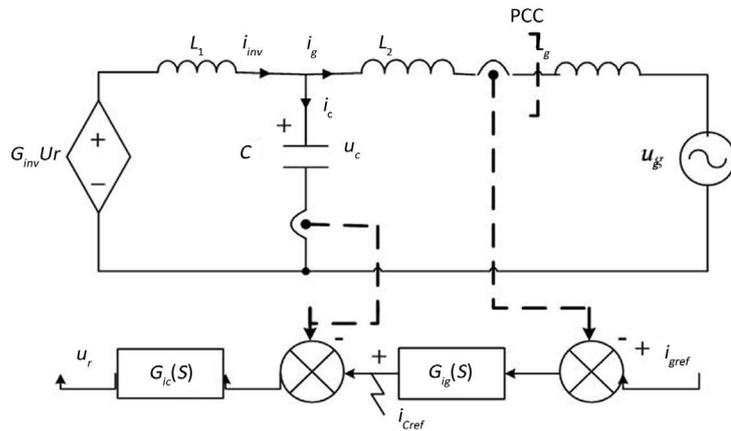
#### 3.3. 多逆变器并网输出阻抗模型

基于输出阻抗模型，包含  $n-1$  个并网逆变器的分布式发电系统结构如图 4 所示。化简为等效的导纳网络，如图 5 所示。图中： $n$  为网络节点数， $Z_{fi}(i = 1, 2, \dots, n-1)$  为线路阻抗。

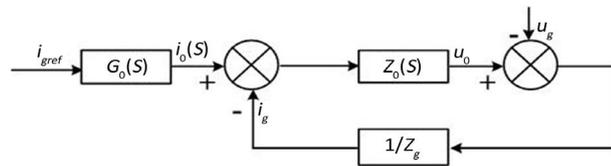
比较图 4 与图 5，可得网络参数的等效关系为：



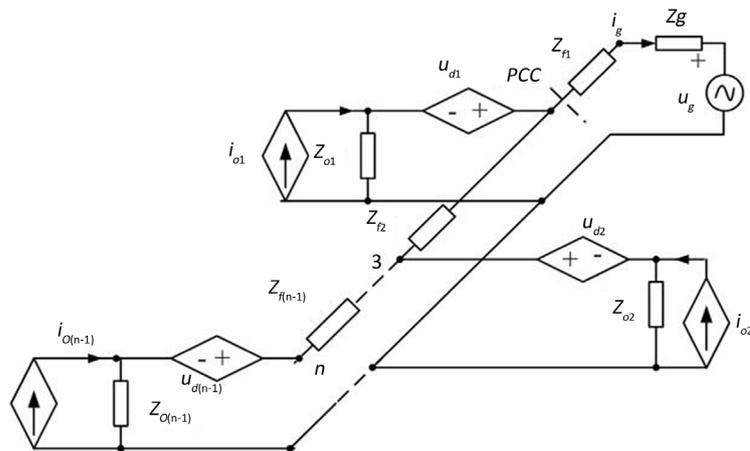
**Figure 1.** The parallel equivalent circuit of two inverters  
**图 1.** 两台逆变器并联等值电路



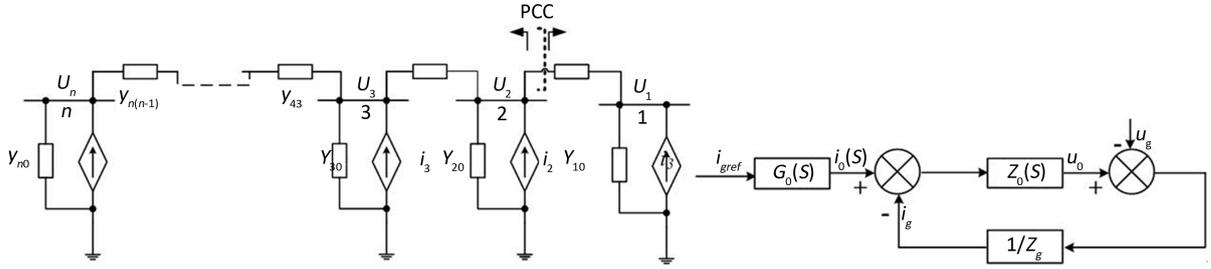
**Figure 2.** The average model of the grid-connected inverter system  
**图 2.** 并网逆变器系统平均模型



**Figure 3.** The output impedance model of the inverter  
**图 3.** 并网逆变器输出阻抗模型



**Figure 4.** The impedance network of distributed generation system  
**图 4.** 分布式发电系统阻抗网络



**Figure 5.** The admittance network of the multi grid-connected inverter system  
**图 5.** 基于输出阻抗模型的多逆变器并网系统等效导纳网络

$$\begin{cases} i_1 = \frac{u_g}{Z_g}, i_2 = i_{o1} + i_{d1}, \dots, i_n = i_{o(n-1)} + i_{d(n-1)} \\ y_{10} = \frac{1}{Z_g}, y_{20} = \frac{1}{Z_{o1}}, \dots, y_{n0} = \frac{1}{Z_{o(n-1)}} \\ y_{21} = \frac{1}{Z_{f1}}, y_{32} = \frac{1}{Z_{f2}}, \dots, y_{10} = \frac{1}{Z_{f(n-1)}} \end{cases} \quad (4)$$

为计算 PCC 处的输入阻抗  $Z_{in}$  和输出阻抗  $Z_{out}$ ，将图 5 沿 PCC 分解为两个独立的导纳网络。根据节点电压法，可得各节点注入电流的节点电压方程，分别为：

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{10} + y_{21} & -y_{21} \\ -y_{21} & y_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{20} + y_{32} & -y_{32} & & & \\ -y_{32} & y_{30} + y_{32} + y_{43} & -y_{43} & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & & -y_{n(n-1)} & y_{n0} + y_{n(n-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

将式(5)写成矩阵形式为  $I_{1,2} = Y_{1,2}U_{1,2}$ ，并在等号两边都前乘  $Y_{1,2}^{-1}$ ，令  $Y_{1,2}^{-1} = Z_{1,2}$ ， $Z_{1,2}$  为节点阻抗矩阵，可得：

$$U_{1,2} = Z_{1,2}I_{1,2} \quad (7)$$

将式(6)写成矩阵形式为  $I_{2,n} = Y_{2,n}U_{2,n}$ ，并在等号两边都前乘  $Y_{2,n}^{-1}$ ，令  $Y_{2,n}^{-1} = Z_{2,n}$ ， $Z_{2,n}$  为节点阻抗矩阵，可得：

$$U_{1,2} = Z_{1,2}I_{1,2} \quad (8)$$

结合图 5，分别取节点阻抗矩阵  $Z_{1,2}$  和  $Z_{2,n}$  中第 2 行第 2 列元素和第 1 行第 1 列元素，即为输入阻抗和输出阻抗：

$$\begin{cases} Z_{in} = [Z_{1,2}]_{(2,2)} \\ Z_{out} = [Z_{2,n}]_{(1,1)} \end{cases} \quad (9)$$

阻抗网络在 PCC 处的总阻抗，即输入阻抗  $Z_{in}$  和输出阻抗  $Z_{out}$  之和：

$$Z_{total} = Z_{in} + Z_{out} \quad (10)$$

当在某一频率处  $Z_{in}$  和  $Z_{out}$  幅值相等而相位差接近  $180^\circ$  时，则阻抗网络发生准谐振，此时总阻抗  $Z_{total}$  达到最小值。若此时并网逆变器非线性因素产生的谐波成分或电网电压的谐波成分正好接近这一频率，

则该次频率附近的并网电流谐波将被放大，严重时导致系统发生振荡，甚至不稳定。

#### 4. 并网风机群系统谐振分析计算

以山西省忻州地区一实际并网风电场为例，该风场有 66 台风机，每台风机类型均为双馈异步，额定容量为 1.5 M，通过 6 条集电线汇集到 35 kV 母线，每条集电线上有 11 台风机，其主要接线图如图 6 所示。

该风场中逆变器桥与电网间滤波器为 LCL 滤波器，其等效拓扑结构如图 7 所示，图中： $L_{1j}$ 、 $L_{2j}$  和  $C_{fj}$  分别为逆变器  $j$  ( $j=1,2,3,4,\dots,n$ ) 的逆变器侧电感、网侧电感和滤波电容； $Z_g$  为变压器漏抗和线路电抗等合成的电网等效阻抗， $u_{kj}$ 、 $i_{ikj}$ 、 $i_{skj}$  分别为逆变器  $j$  的逆变器输出电压、逆变器输出电流和逆变器并网电流； $u_{pcck}$ 、 $u_{gk}$  和  $i_{sk}$  分别为并网公共点电压、电网电压和并网总电流。

图中逆变器  $j$  采用电容电流反馈实现有源阻尼策略，并且在  $\alpha\beta$  坐标系下实现解耦控制[11]。

对于风电场中每台风机，并网系统的框图如图 8 所示。

该风场中 LCL 滤波器参数如表 1 所示。

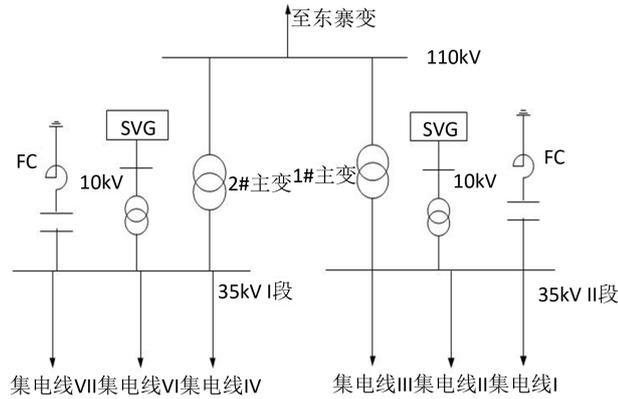


Figure 6. Main wiring diagram of the wind farm  
图 6. 并网风电场主要接线图

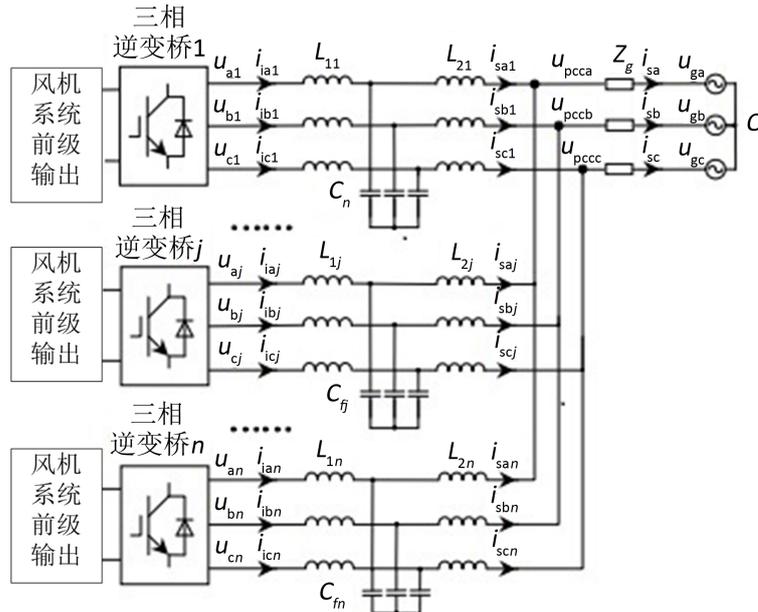


Figure 7. Equivalent topology of large-scale wind farm  
图 7. 大型风场等效拓扑结构

利用并网逆变器群输出阻抗模型，在 Matlab 环境下进行编程及仿真，分析并网风电场的谐振情况。按每台风机发电率为 80% 来计算，投运风机台数分别为 1~66 台时，得到对应短路比。

最大运行方式时，投运风机台数不同时，短路比与谐振次数、谐振阻抗值的对应关系如表 2 所示，根据表 2 中所得数据，做出短路比与谐振次数、系统阻抗值的变化关系图，如图 9 所示；最小运行方式时，投运风机台数不同时，短路比与谐振次数、谐振阻抗值分别如表 3 所示，最小运行方式时，短路比与谐振次数、谐振阻抗值的变化曲线如图 10 所示。

根据以上数据，谐振频率随短路比增加而降低，即风机上网功率越大，并网系统越不稳定，更易发生谐振。这一结果与短路比的概念相符，短路比是指系统短路容量与设备容量的比值，系统短路容量越大，则系统戴维南等效电阻越小，负荷、并联电容器或电抗器的投切不会引起电压幅值大的变化，因此系统较强。当电力设备连接到短路比较大的系统时，设备的投切对系统的影响相对较弱。

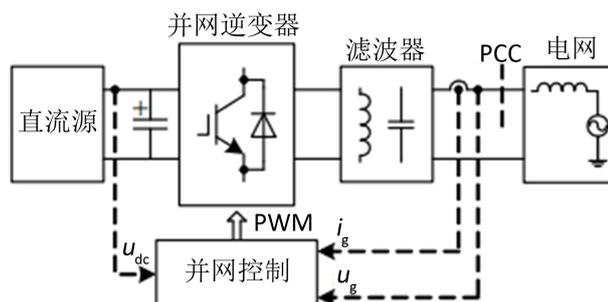


Figure 8. System diagram of grid-connected inverter  
图 8. 并网逆变器系统框图

Table 1. LCL filter parameters  
表 1. LCL 滤波器参数

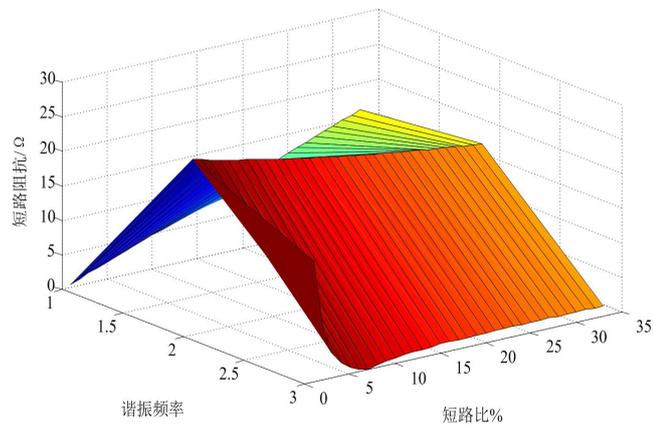
逆变器侧电感 $L_{inv}$		电网侧电感 $L_g$		滤波电容 $C$		滤波电阻 $R$	
电感量/mH	额定电流/A	电感量/mH	额定电流/A	电容量/ $\mu$ F	额定电压/V	阻值/ $\Omega$	额定功率/W
0.025	500	0.4	205	33.4	1075	1	600

Table 2. The resonance characteristic in different short circuit ratio (maximum operational mode)  
表 2. 不同短路比对应的谐振特性(最大运行方式)

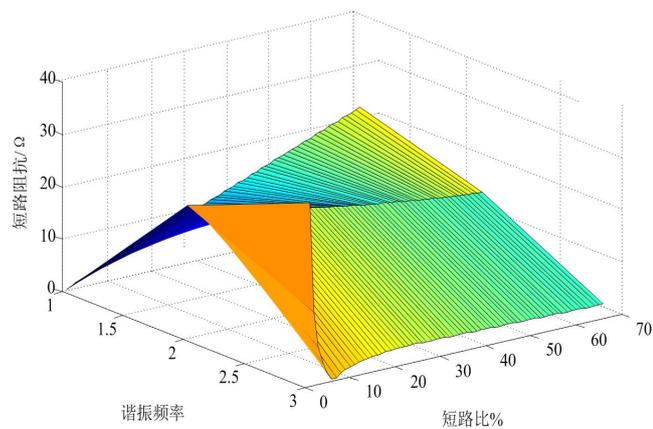
风机台数	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
短路比%	0.49	0.98	1.47	1.96	2.44	2.93	3.42	3.91	4.40	4.89	5.38
谐振频率	21.27	21.14	21.01	20.89	20.76	20.63	20.51	20.38	20.26	20.13	20.01
谐振阻抗	4.18	2.08	1.38	1.03	0.82	0.68	0.58	0.51	0.45	0.40	0.36
风机台数	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44
短路比%	5.87	6.35	6.84	7.33	7.82	8.31	8.80	9.29	9.78	10.26	10.75
谐振频率	19.89	19.77	19.65	19.54	19.42	19.31	19.19	19.08	18.97	18.86	18.75
谐振阻抗	0.33	0.30	0.28	0.26	0.24	0.23	0.21	0.20	0.19	0.18	0.17
风机台数	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66
短路比%	11.24	11.73	12.22	12.71	13.20	13.69	14.18	14.66	15.15	15.64	16.13
谐振频率	18.64	18.53	18.42	18.32	18.21	18.11	18.01	17.91	17.81	17.71	17.61
谐振阻抗	0.16	0.16	0.15	0.14	0.14	0.13	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11

**Table 3.** The resonance characteristic in different short circuit ratio (minimum operational mode)  
**表 3.** 不同短路比对应的谐振特性(最小运行方式)

风机台数	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
短路比%	0.66	1.33	1.99	2.66	3.32	3.99	4.65	5.32	5.98	6.65	7.31
谐振频率	21.14	20.89	20.63	20.38	20.13	19.89	19.65	19.42	19.19	18.97	18.75
谐振阻抗	2.08	1.03	0.68	0.51	0.40	0.33	0.28	0.24	0.21	0.19	0.17
风机台数	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44
短路比%	7.98	8.64	9.31	9.97	10.64	11.30	11.97	12.63	13.30	13.96	14.63
谐振频率	18.53	18.32	18.11	17.91	17.71	17.51	17.32	17.13	16.94	16.76	16.59
谐振阻抗	0.16	0.14	0.13	0.12	0.11	0.11	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08
风机台数	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66
短路比%	15.29	15.96	16.62	17.29	17.95	18.61	19.28	19.94	20.61	21.27	21.94
谐振频率	16.41	16.24	16.07	15.91	15.75	15.59	15.43	15.28	15.13	14.99	14.84
谐振阻抗	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05



**Figure 9.** The value changing curve of short circuit ratio, resonant frequency and resonant impedance in the maximum operating mode  
**图 9.** 最大运行方式下短路比、谐振频率与谐振阻抗值的变化曲线



**Figure 10.** The value changing curve of short circuit ratio, resonant frequency and resonant impedance in the minimum operating mode  
**图 10.** 最小运行方式下短路比、谐振频率与谐振阻抗值的变化曲线

谐振时的阻抗值表征了谐振峰值的大小, 阻抗值越小, 发生谐振时, 谐振放大倍数越大, 对系统元件的危害则越大。

根据表 3 数据可知, 最大运行方式下, 谐振频率随短路比的增加而降低, 风机上网功率越大, 并网系统越易发生谐振, 使系统可能发生谐振的频次范围为 18 次谐波到 26 次谐波; 当短路比低于 4% 左右时, 谐振阻抗值随短路比的增加变化较大, 当短路比高于 4% 时, 谐振阻抗值随短路比的增加变化较小, 且短路比越大, 谐振阻抗值变化越小, 甚至趋于不变, 说明在该情况下发生谐振时, 谐振阻抗值越小, 谐振放大倍数较大, 会对系统造成强烈冲击。

最小运行方式与最大运行方式下的规律相同, 使系统可能发生谐振的频次范围为 15 次谐波到 26 次谐波; 在短路比达到 3% 左右时, 谐振阻抗值随短路比的增加变化较小, 说明在该情况下发生谐振时, 谐振放大倍数较大, 对系统的冲击较强。

## 5. 结论

本文研究了风机逆变器谐振原理, 通过对并网风机群阻抗建模及系统谐振分析, 得出风机并网台数、风机输出功率对谐振特性的影响。在风电场建设初期, 有必要对并网风机群的谐波谐振特性进行评估, 并充分考虑接入系统的风机台数与谐振阻抗等参数, 对风电机组逆变器选型及设计进行优化, 确保风电场并网运行的稳定性。

## 参考文献 (References)

- [1] Dannehl, J., Wessels, C. and Fuchs, F.W. (2009) Limitations of Voltage-Oriented PI Current Control of Grid-Connected PWM Rectifiers with Filters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **144**, 380-388. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2008774>
- [2] Koutroulis, E. and Blaabjerg, F. (2012) Methodology for the Optimal Design of Transformerless Grid-Connected PV Inverters. *IET Power Electronics*, **5**, 1491-1499. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2012.0105>
- [3] 许德志, 汪飞, 毛华龙, 阮毅, 张巍. 多并网逆变器与电网的谐波交互建模与分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 64-71.
- [4] 杨超颖, 吴玉龙, 毛瑞, 杜慧杰, 韩斐. 计及电缆对地电容和风机功率的多风机并网谐振分析[J]. 电测与仪表, 2016, 53(7): 33-38.
- [5] 唐振东, 杨洪耕, 马晓阳, 谭洋洋. 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.
- [6] 胡伟, 孙建军, 马谦, 刘飞, 查晓明. 多逆变器并网系统谐振特性分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(7): 93-98.
- [7] 匡慧敏, 罗安, 陈智勇, 陈燕东, 等. 多逆变器并网耦合谐振机理及有源阻尼优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 1180-1189.
- [8] 杭丽君, 李宾, 黄龙, 姚文熙, 吕征宇. 一种可再生能源并网逆变器的多谐振 PR 电流控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(12): 51-58.
- [9] 田鹏, 宣文华, 牛益国. 基于陷波控制的 LCL 型光伏并网逆变器谐波谐振抑制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 82-88.
- [10] 汤赐. 基于 LCL 型输出滤波器的多并网逆变器系统的反谐振, 谐振机理分析[J]. 广东电力, 2014, 27(7): 41-48.
- [11] Arcuri, S., Liserre, M. and Ricchiuto, D. (2011) Stability Analysis of Grid Inverter LCL-Filter Resonance in Wind or Photovoltaic Parks. *37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Melbourne, 7-10 November 2011, 2499-2504. <https://doi.org/10.1109/iecon.2011.6119702>

**期刊投稿者将享受如下服务：**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[sg@hanspub.org](mailto:sg@hanspub.org)