

# 新能源并网谐振过电压分析

邹福强<sup>1</sup>, 吴冲<sup>1</sup>, 钟帆<sup>2</sup>, 李卫兰<sup>2</sup>, 刘毅<sup>1</sup>, 张胜飞<sup>1</sup>

(1. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610056;

2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756)

**摘要:**基于新能源发电技术的快速发展, 新能源发电所占比例呈逐年增大的趋势。新能源通过逆变装置接入后会给电力系统注入谐波, 当其大规模并网后谐波含量丰富, 可能会有谐振过电压的潜在风险。首先, 针对光伏并网系统建立谐波数学模型, 对单个新能源场站接入系统进行谐波分析, 分析逆变器参数、线路参数及电网等效阻抗对谐振后系统电压产生的影响; 然后, 对多个新能源接入系统进行谐波分析, 探究新能源不同规模接入时系统谐振变化规律及对系统电压造成的影响。

**关键词:**新能源并网; 谐振过电压; 谐波模型; 谐振变化规律

**中图分类号:** TM 46 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)05-0012-09

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6958.20230503

## Resonant Overvoltage Analysis of Renewable Energy Grid-connected System

ZOU Fuqiang<sup>1</sup>, WU Chong<sup>1</sup>, ZHONG Fan<sup>2</sup>, LI Weilan<sup>2</sup>, LIU Yi<sup>1</sup>, ZHANG Shengfei<sup>1</sup>

(1. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group,

Chengdu 610056, Sichuan, China; 2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong

University, Chengdu 611756, Sichuan, China)

**Abstract:** Based on the rapid development of renewable energy generation technology, the proportion of renewable energy generation is increasing year by year. And renewable energy will introduce harmonics into power system after being integrated through inverters. When renewable energy is linked to the grid on a large scale, the harmonic content is abundant and there may be a possible risk of resonant overvoltage. Firstly, a harmonic mathematical model is established for photovoltaic grid-connected system. Then, harmonic analysis on a single renewable energy site access system is carried out, and the impact of inverter parameters, line parameters, and grid equivalent impedance on system voltage after resonance is analyzed. And harmonic analysis on a variety of renewable energy access systems is also carried out to investigate the resonance variation pattern of renewable energy access at various scales and its impact on system voltage.

**Key words:** renewable energy integration; resonant overvoltage; harmonic model; resonance variation pattern

## 0 引言

随着国内大力发展新能源技术, 风力、光伏等新能源发电比例逐年增长, 目前已成为中国新能源利用的重要组成部分。光伏、风电等新能源通常通过逆变装置接入电网, 由于采用脉冲宽度调制的逆变装置会产生谐波注入电网, 特别是当新能源大规模并入电网时谐波可能会导致系统过电压威胁电网运行的安全<sup>[1-3]</sup>。

目前针对新能源并网谐波问题已有大量研究。部分文献着重探讨了模型的精确建立并且大都是针对实例进行分析。文献[4-5]均对逆变器并网系统进行了阻抗分析, 用硬件设施进行了验证, 得出了逆变器的准确模型并进行了稳定性分析; 文献[6]针对大型光伏电站建立了阻抗模型并用工程测试进行了验证; 文献[7-8]根据风电并网的控制策略建立了阻抗模型。但上述研究均针对新能源并网系统中的电力电子装置进行建模, 并没有考虑包括

变压器、电网、输电线的综合模型。也有文献在建立逆变器模型的同时考虑了输电线的模型,例如文献[9]主要针对新能源并网系统建立了输电电缆的谐波模型。

在谐振分析方法上,新能源并网逆变器系统谐振分析传统方法主要是频谱分析法和频域分析法。频谱分析法向测试节点注入幅值和频率均特定的电流,用于求解该节点对应频率输入阻抗,通过改变节点注入电流的频率可求解得到节点阻抗关于频率的变化曲线,进一步可用来判断谐振是否存在以及谐振的频率。基于并网逆变器输出阻抗等效建模的频域分析法的思想是:根据建模结果推导并网逆变器输出电流表达式,确定并网电流发生谐振的因素,每一影响因素对应一个传递函数的伯德图,可进一步求解谐振频率<sup>[10-11]</sup>。由于频域分析法需要建立高阶传递函数,计算量大,文献[12]首次提出了模态分析法,能够获得更多的谐振信息;文献[13-16]将模态分析法运用于新能源并网系统中并在建立谐波模型时考虑了控制的延时等非线性因素。但以上研究大多针对单个新能源连接到系统时的谐振问题,对于新能源接入规模对谐振的影响并没有涉及,并且上述研究虽然探究了新能源并网系统的谐振分布,但是缺少逆变器参数和电网参数对谐振的影响。

为分析多个新能源接入系统时谐振对系统电压的影响,首先,根据逆变装置控制策略建立新能源接入系统的谐波模型;然后,对单个新能源接入系统进行谐波分析,探究各种参数对系统电压的影响;最后,对多个新能源接入系统进行谐波分析,探究不同规模新能源接入及采用不同参数逆变器的新能源并网系统的谐振变化规律以及对系统电压造成的影响。

## 1 新能源并网系统建模

### 1.1 新能源并网系统结构

典型的多个新能源并网系统结构如图1所示,这里仅选取光伏进行分析。 $n$ 个光伏阵列产生的能量通过变换器到达各逆变装置,各个逆变装置通过LCL滤波器并入电网。图1中: $L_{1n}$ 、 $L_{2n}$ 、 $C_n$ 、 $C_{dcn}$ 分别为逆变器侧电感、网侧电感、滤波电容、直流侧电容; $Z_g$ 和 $U_g$ 分别为电网等效阻抗和等效电压。

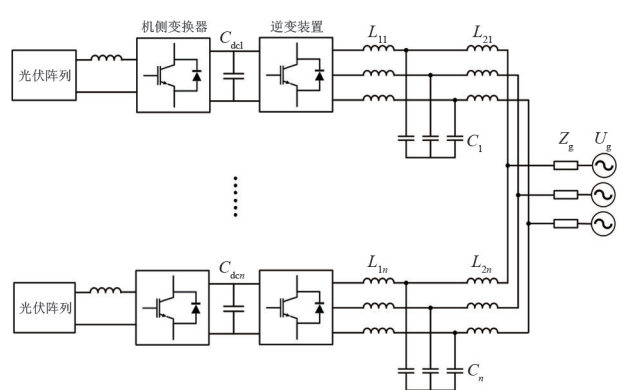


图1 新能源并网系统结构

光伏并网系统一般由光伏阵列通过机侧变换器再通过逆变装置与电网连接。其中,机侧变换器为DC/DC变换器,可将光伏电池输出较宽范围的低压直流电变成电压较高的稳定直流电,同时可实现输入端与输出端的电气隔离,稳定的直流电再通过逆变装置串联LCL滤波器并入电网。

当新能源并网数量较大时,通过逆变装置进入电网的电流含有丰富的谐波成分。为掌握系统谐振特性,并防止注入谐波与系统谐振点重合出现过电压的情况,需要建立新能源并网系统的谐波阻抗模型对系统谐振情况进行分析。

### 1.2 新能源并网系统谐波模型

在对新能源并网系统建立谐波模型时,将电网等效阻抗左侧的系统进行戴维南等效。由于逆变装置主要实现对逆变侧电流的控制,并且新能源并网系统谐振主要受输出电流影响,因此仅需针对逆变装置的电流控制策略,将逆变装置交流端口左端系统等效为电压源串联阻抗的形式。以图2所示单个LCL型逆变装置作为基本单元进行建模,逆变装置交流回路通过LCL滤波器接入电网。

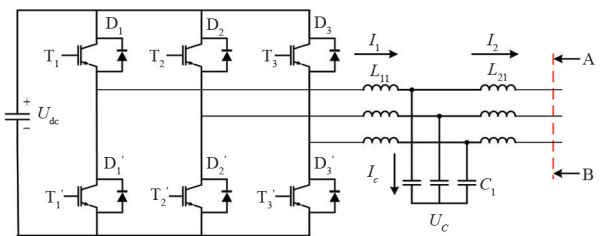


图2 三相LCL型并网逆变装置结构

为保证系统稳定运行且能够以较高的功率因数向电网输送电能,并网LCL型逆变装置采用逆变装置侧电流 $I_1$ 闭环和电容电流 $I_c$ 前馈的控制策略<sup>[14]</sup>,其控制框图如图3所示。电流内环的指令信号由电压外环计算给出,并且由于新能源并网谐振

主要体现在输出电流上,因此只需对电流控制策略进行分析<sup>[10]</sup>。图 3 中  $G_i(s)$  为电流控制器传递函数,电流控制器采用 PI 控制,如式(1)所示,其中  $K_p$ 、 $K_i$  分别为比例、积分控制系数。

$$G_i(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (1)$$

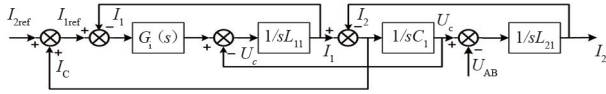


图 3 逆变装置控制

利用图 3 的控制结构框图来对图 2 AB 端进行戴维南等效,可得开路电压  $U_{oc}$ 、短路电流  $I_{sc}$  和等效阻抗  $Z_{eq}$  的表达式,如式(2)所示。由此可得基本单元的谐波模型如图 4 所示,其中  $Z_l$  和  $Z_g$  分别为线路阻抗和电网阻抗。

$$\begin{cases} U_{oc}(s) = \frac{G_i(s)}{s^2 L_{11} C_1 + 1} I_{2ref} \\ I_{sc}(s) = \frac{G_i(s)}{s^3 L_{11} L_{21} C_1 + s(L_{11} + L_{21}) + G_i(s)} I_{2ref} \\ Z_{eq}(s) = \frac{s^3 L_{11} L_{21} C_1 + s(L_{11} + L_{21}) + G_i(s)}{s^2 L_{11} C_1 + 1} \end{cases} \quad (2)$$

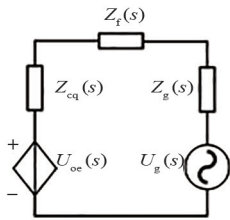


图 4 新能源并网模型

## 2 单个新能源并网谐振分析

### 2.1 模态分析法

模态分析法是将逆变器并网系统等效为一个多节点网络系统。根据图 4 可以建立单逆变器系统的 2 阶节点导纳矩阵  $Y_2$ ,如式(3)所示。

$$Y_2 = \begin{pmatrix} \frac{1}{Z_{eq1}(s)} + \frac{1}{Z_{l1}(s)} & -\frac{1}{Z_{l1}(s)} \\ -\frac{1}{Z_{l1}(s)} & \frac{1}{Z_{l1}(s)} + \frac{1}{Z_g(s)} \end{pmatrix} \quad (3)$$

系统发生谐波谐振时,网络节点导纳矩阵  $Y_2$  往

往出现极小值,  $Y_2^{-1}$  中则出现极大值,系统相应节点会产生非常高的电压,此时为并联谐振最为严重的情形<sup>[12]</sup>。

若该新能源并网系统在频率  $f$  处发生并联谐振,则节点电压矩阵  $U_f$ 、节点导纳矩阵  $Y_2$ 、节点注入电流矩阵  $I_f$  有

$$U_f = Y_2^{-1} I_f \quad (4)$$

对网络节点导纳矩阵  $Y_2$  进行特征值分解,则左特征向量矩阵  $L$ 、特征值矩阵  $\Lambda^{-1}$ 、右特征向量矩阵  $T$  有

$$U_f = L \Lambda^{-1} T I_f \quad (5)$$

将特征值矩阵  $\Lambda^{-1}$  的对角矩阵元素  $\lambda^{-1}$  定义为“系统模态阻抗  $Z$ ”。当  $\lambda=0$  或者接近于 0 时,意味着并联谐振的发生,此时很小的注入电流  $I_f$  都将导致很大的电压,这就是谐振过电压现象。

传统谐振分析方法仅能获得谐振频率,且当新能源并网系统中逆变器数量增多、逆变器参数不同时,分析过程难度将增大。相比之下,在模态域中更易识别出谐振的位置,且模态分析法仅需围绕新能源系统网络对节点导纳矩阵进行分析,过程较为简便。

### 2.2 单逆变器谐振模态分析

在建立系统节点导纳矩阵的基础上,依据图 5 所示的模态分析流程,忽略逆变器侧、电网侧电感寄生电阻,采用表 1 中 I 类滤波电路、线路、电网参数<sup>[13-15]</sup>,利用 Matlab 编程计算得到图 6 所示的 2 节点模态阻抗曲线。

采用标么值来对谐振频率进行描述,50 Hz 为

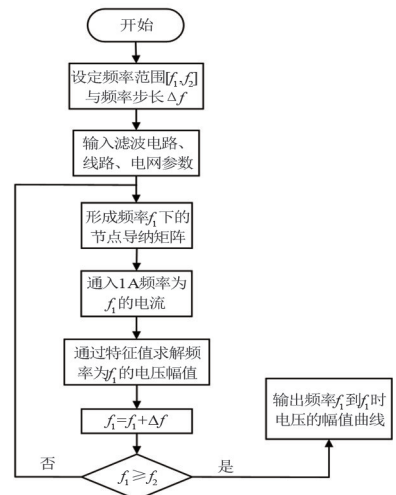


图 5 模态分析流程

表 1 系统参数

参数	I / II 类逆变器
逆变器侧电感 $L_1/\text{mH}$	4/1
滤波电容 $C/\mu\text{F}$	40/20
网侧电感 $L_2/\text{mH}$	0.5/0.2
线路电阻 $R_l/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.11
线路电感 $L_l/(\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$	1.2
线路电容 $C_l/(\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$	0.07
线路长度 $l_l/\text{km}$	6
电网电阻 $R_g/\Omega$	0.5
电网电感 $L_g/\text{mH}$	1
电网电压 $U_g/\text{V}$	220
电流控制系数 $K_p$	1
电流控制系数 $K_i$	200
电网频率 $f_g/\text{Hz}$	50

1 pu,将图 4 中单个新能源并网模型划分为新能源和电网两个节点,即存在两种模式阻抗,分别定义这两种模式阻抗随频率变化的过程为模式 1、模式 2。由图 6 可知,在注入幅值为 1 A、频率为 2~200 pu 谐波电流后,可以看出频率为 9.6 pu 和 151.5 pu 的电压幅值有明显升高,说明系统存在两个谐振点,如果新能源并网逆变器产生这两个频率的电流,将可能导致谐振过电压。

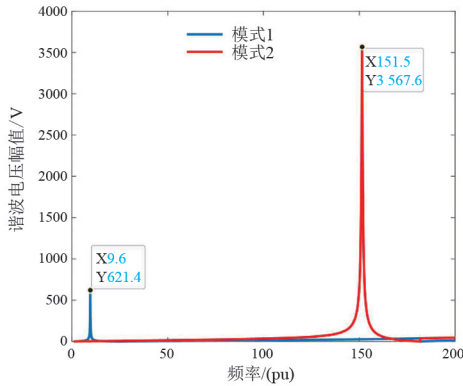


图 6 2 节点模式阻抗曲线

为防止步长  $\Delta f$  对分析结果准确性产生影响,对不同步长下系统谐振点的变化进行了分析,结果如图 7 所示。可见在 1~10 Hz 之间,步长对谐振频率的分析结果影响不大,均能满足对分析精度的要求,因此后续分析中均设置步长为 5 Hz。

2.2.1 LCL 参数的影响

在逆变装置侧电流  $I_1$  闭环和电容电流  $I_c$  前馈的控制策略下,分别改变参数逆变器电感  $L_1$ 、滤波电容  $C$ 、网侧电感  $L_2$ ,模态分析结果如图 8—图 10 所示。

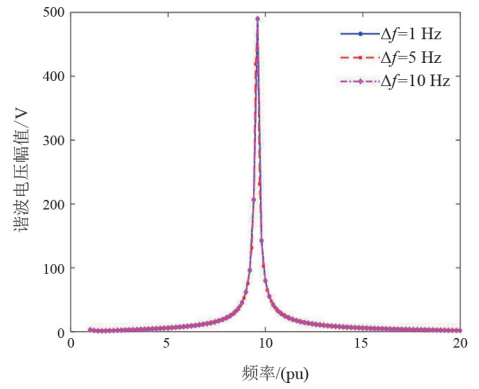


图 7 不同步长模态分析结果

由图 8(a)可知,随着逆变器侧电感  $L_1$  从 1 mH 变化到 4 mH,模式 1 谐振点的谐振频率逐渐从 16.7 pu 减小到 9.6 pu,谐波电压幅值呈现逐渐上升的趋势,而图 8(b)中模式 2 谐振点的谐振频率和引起的谐波电压幅值都无明显变化。

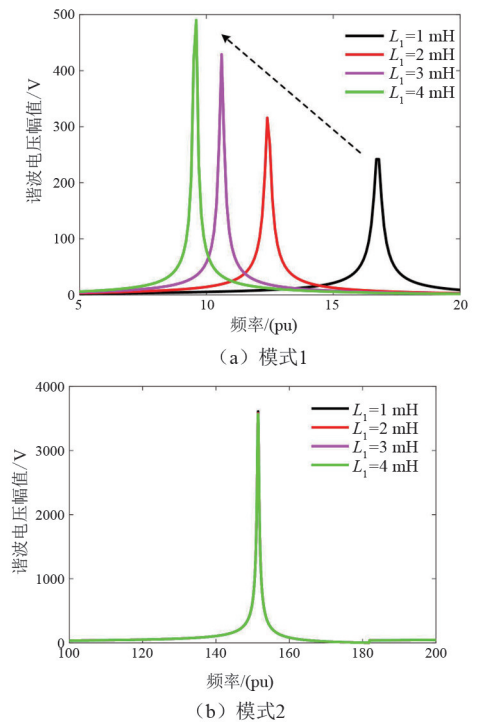


图 8  $L_1$  参数变化模态分析结果

由图 9(a)可知,当滤波电容  $C$  从 10  $\mu\text{F}$  变化到 40  $\mu\text{F}$  时,模式 1 谐振点的谐振频率逐渐从 19.1 pu 减小到 9.6 pu,谐波电压幅值大幅降低;由图 9(b)可知,电容值发生变化,模式 2 谐振点的谐振频率从 152.1 pu 减小到 151.5 pu,引起的谐波电压仅有略微影响。

由图 10(a)可知,网侧电感  $L_2$  从 0.2 mH 增大到 0.5 mH 时,模式 1 谐振点的谐振频率几乎没有变化但引起的谐波电压幅值逐渐降低;而从图 10(b)

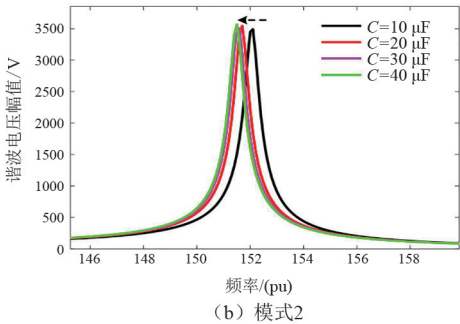
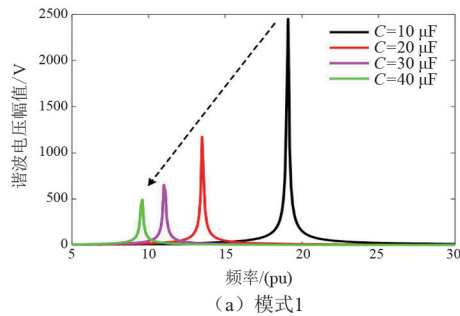


图 9 C 参数变化模态结果分析

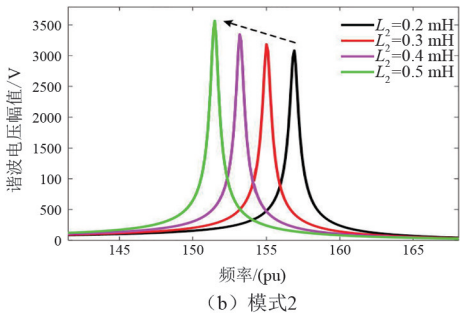
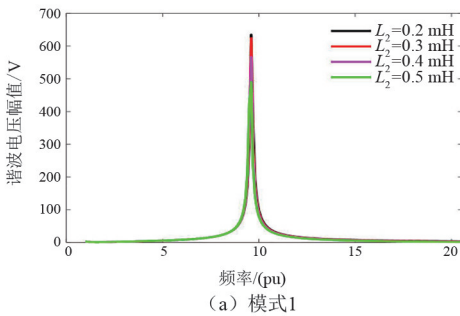


图 10 L<sub>2</sub> 参数变化模态分析结果

中可以看出模式 2 谐振点的谐振频率从 156.9 pu 减小到 151.5 pu,引起的谐波电压幅值逐渐增大。

以上分析可以得出,通过对逆变器侧电感  $L_1$  和滤波电容  $C$  的适当设计,可以使模式 1 谐振点的谐振频率发生改变避免低次谐波;通过对网侧电感  $L_2$  的适当设计,可以使模式 2 谐振点的谐振频率发生偏移避免高次谐波。

2.2.2 控制参数的影响

图11为逆变器控制参数变化时的模态分析结

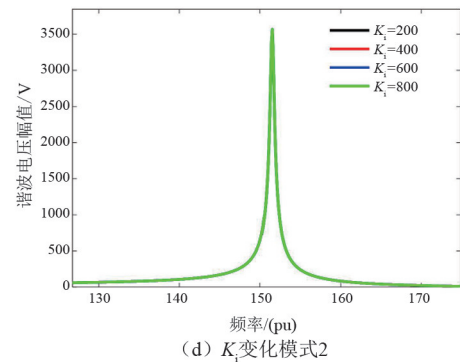
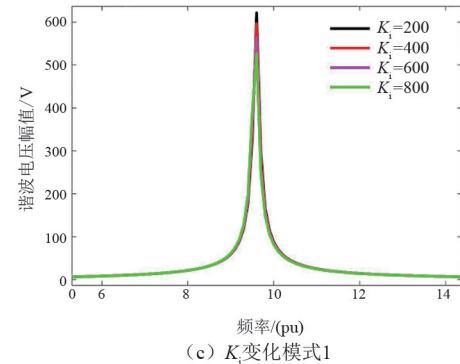
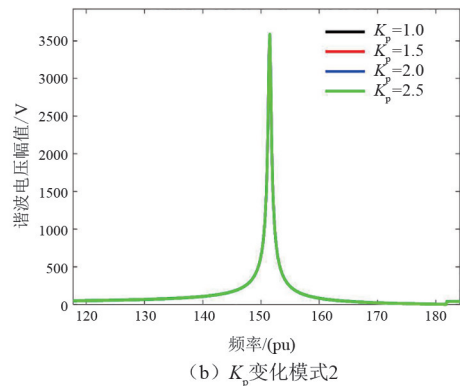
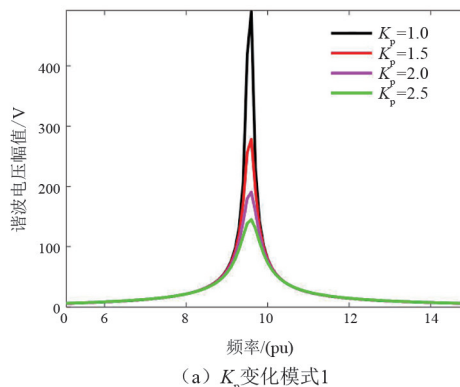


图 11 控制参数变化模态分析结果

果。由图 11(a)可知当控制器参数  $K_p$  从 1.0 变化到 2.5 时,模式 1 谐振点的谐振频率几乎没有变化,而谐振导致的谐波电压幅值大幅减小;由图 11(b)可知,  $K_p$  对模式 2 谐振点几乎没有影响;由图 11(c)、(d)可以看出,控制器参数  $K_i$  仅仅对模式 1 谐振点

引起的谐波电压有较小影响。由以上分析可知,在满足控制效果的前提下,适当增大控制器参数  $K_p$  可使模式 1 谐振点引起的谐波电压幅值大大降低从而降低低频谐振风险。

### 2.2.3 线路阻抗参数的影响

忽略线路电阻和电容的变化,图 12 给出线路电抗  $L_r$  变化时的模态分析结果。由图 12(a)可知:当线路电抗从 0.5 mH/km 变化到 2.0 mH/km 时,模式 1 谐振点的谐振频率从 10.9 pu 降低到 9.0 pu,引起的谐波电压幅值从 868.3 V 减少到 588.1 V;图 12(b)中显示的模式 2 的谐振频率从 194.7 pu 降低到 125.5 pu,引起的谐波电压幅值从 6 018.9 V 减少到 2 358.8 V,谐振点变化情况和模式 1 类似,但是变化幅度远大于模式 1,说明模式 2 谐振点受线路电抗的影响更大。

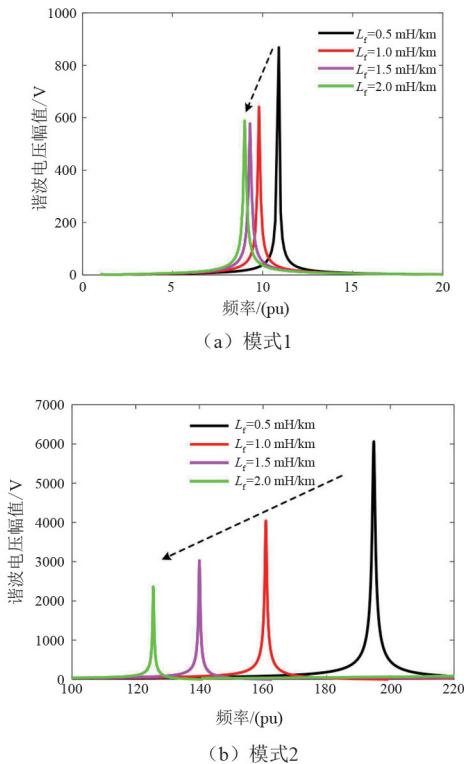


图 12  $L_r$  变化模态分析结果

### 2.2.4 电网阻抗参数的影响

电网电阻本身的变化并不会影响并网系统的谐振频率,因此分析谐振特性时,同样忽略电网电阻的影响。电网电抗  $L_g$  变化时模态分析结果如图 13 所示。当  $L_g$  从 0.5 mH 变化到 2.0 mH 时,模式 1 谐振点的谐振频率从 9.7 pu 降低到 9.4 pu,引起的谐波电压幅值从 457.2 V 增加到 600.5 V;模式 2 的谐振频率从 160.1 pu 降低到 138.6 pu,引起的谐波电压

幅值从 1 561.3 V 增加到 9 662.8 V。因此电网电抗对系统高次谐振点影响较大,新能源在接入时,对其选择也尤其重要。

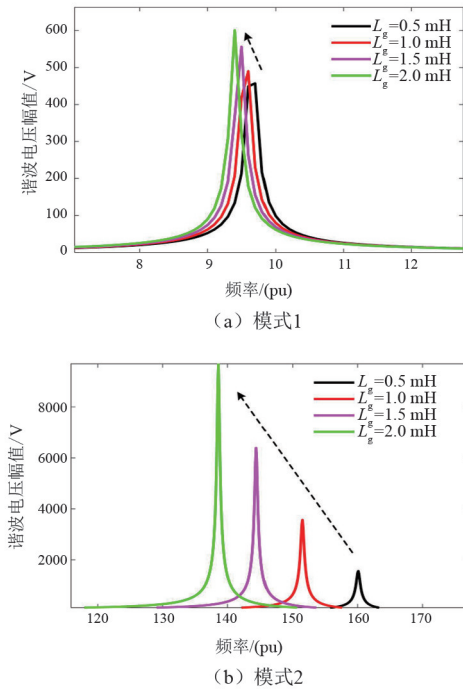


图 13  $L_g$  参数变化模态分析结果

## 3 不同规模新能源并网谐振分析

### 3.1 相同参数新能源并网谐振分析

当有多个新能源并入系统时,可得谐波模型如图 14 所示。第  $n+1$  个节点为  $n$  个新能源站并入系统的公共连接点,每个新能源等效模型通过线路等效阻抗  $Z_{ti}$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) 并入公共连接点。根据式(5)可知, $n+1$  个节点拥有  $n+1$  个模态阻抗,系统存在  $n+1$  个谐振模式。

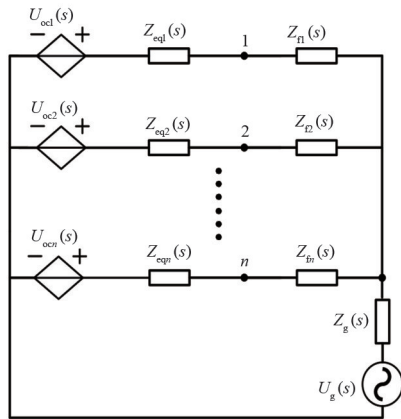


图 14 多新能源并网模型

由图 14 可列出  $n$  台逆变器并网的节点导纳矩

阵的通用表达式  $Y_{n+1}$  为

$$Y_{n+1} = \begin{pmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1(n+1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{1(n+1)} & \cdots & Y_{(n+1)(n+1)} \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中,

$$\begin{cases} Y_{11} = \frac{1}{Z_{eq1}(s)} + 0 + \cdots + \frac{1}{Z_{f1}(s)} \\ Y_{1(n+1)} = -\frac{1}{Z_{f1}(s)} \\ Y_{(n+1)(n+1)} = \frac{1}{Z_g(s)} + \frac{1}{Z_{f1}(s)} + \frac{1}{Z_{f2}(s)} + \cdots + \frac{1}{Z_{fn}(s)} \end{cases}$$

根据式(6)可求解第 2、3、4 台逆变器并网时新能源系统的节点导纳矩阵。按照图 5 流程以及表 1 中的 I 类逆变器参数,可求得不同规模新能源并网谐振特性,如图 15 所示。图中  $n=2$  时模式 3 与模式 4 完全重合; $n=3$  时模式 3、模式 4、模式 5 也完全重合。由图 15 可见:随着新能源数量的增加,系统节点增加,谐振模式随之增加;随着新能源数量的增加,低频谐振点的谐振频率集中于 9.0 pu 左右,引起的谐波电压幅值逐渐增大;出现了两个高频谐振点,其中 170.4 pu 的谐振点在不同新能源并网数量下频率没有发生改变,但是模式 1 谐振点的谐振频率随着新能源并网数量的增加而逐渐降低。

### 3.2 不同参数新能源并网谐振分析

根据表 1 中 I、II 类数值,得到如表 2 所示的组合设置,并网模态分析结果如图 16 所示。相较于第 3.1 节分析的仅含 I 类逆变器的系统,当系统中同时含 I、II 类逆变器时,系统模态增加,谐振点增加,低频谐振点引起的谐波电压最大幅值降低,高频谐振点引起的谐波电压最大幅值降低。该结果表明,新能源并网系统中谐振情况不仅与新能源并网规模有关,逆变器类型以及参数也会给系统谐振带

表 2 I、II 类逆变器组合设置

并网逆变器规模 $n$	组合编号	逆变器类别
2	1	I、II
3	2	I、I、II
	3	I、II、II
	4	I、I、I、II
4	5	I、I、II、II
	6	I、II、II、II

来较大影响。

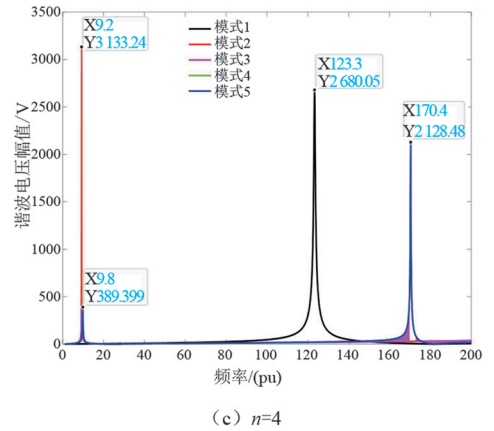
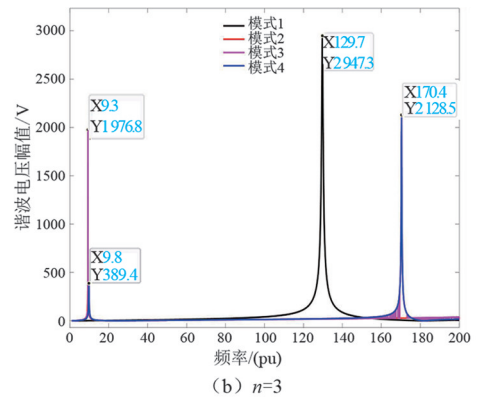
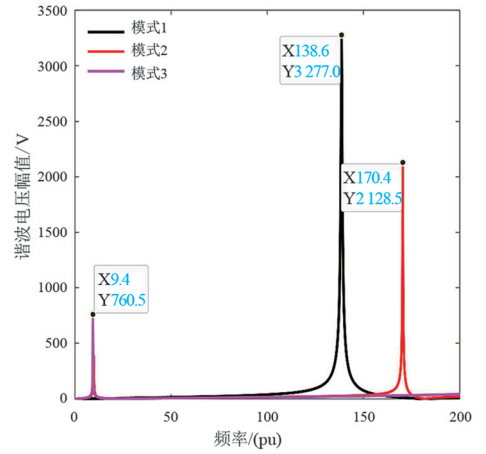
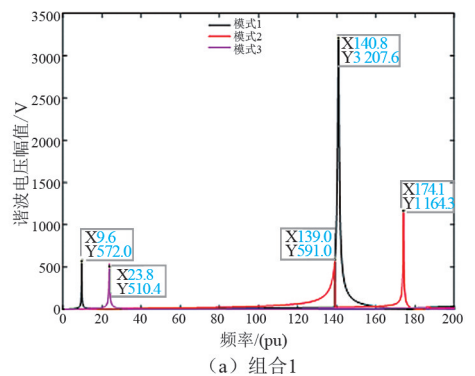


图 15 不同数量新能源并网模态分析结果



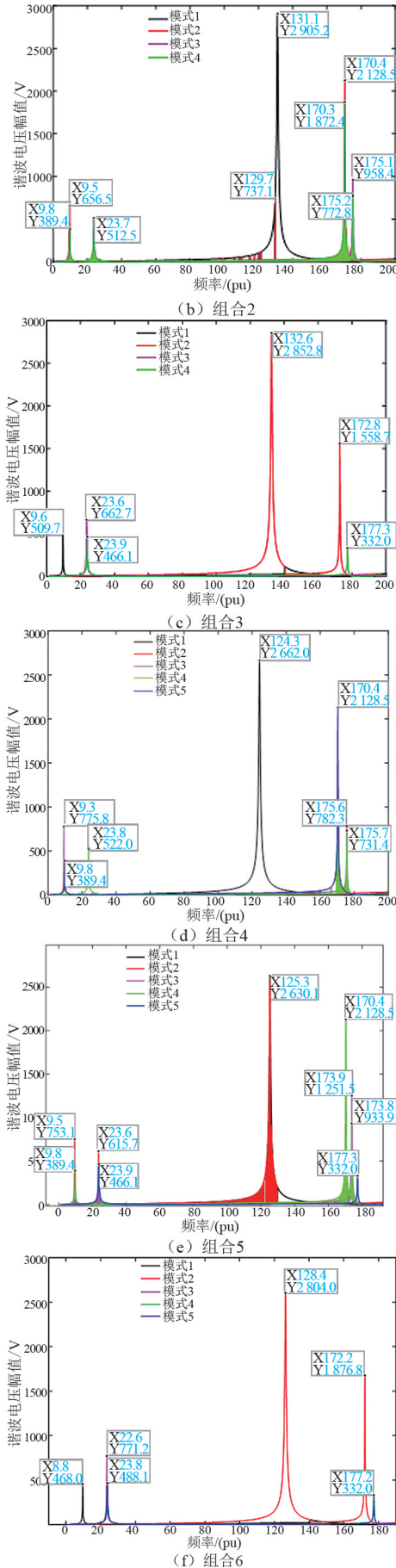


图 16 组合 1~6 新能源并网模态分析结果

## 4 仿真实验

为验证理论分析的正确性,以第 3.2 节中 4 个逆变器并网组合 4 为例,分别对 5 个节点进行频率扫描,将频率扫描的仿真结果与理论结果进行对比。

由所建立的模型可知,逆变器 1 为节点 1,以此类推,逆变器 4 为节点 4,逆变器与电网连接的公共连接点为节点 5,向 5 个节点分别施加频率为 2~200 pu 幅值为 1 A 的谐波电流。为了获得各个频率下的谐振情况,将时域的电压信号进行分解,得到对应的谐波电压幅值如图 17 所示,5 个节点观察到的所有谐振点与图 16(d)一致。这验证了所提理论分析的正确性,其中节点 1~3 观察到的谐振情况完全一致,公共连接点仅能观察到频率为 124 pu 的谐振

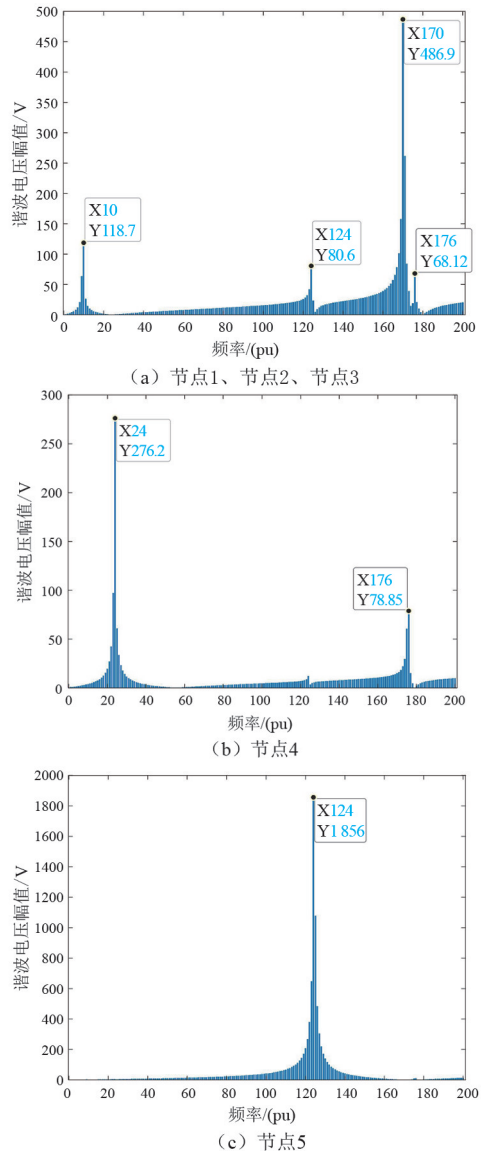


图 17 组合 4 频率扫描仿真结果



点。由频率扫描仿真结果可知,需要对多节点进行扫描才可以获得系统所有的谐振点,而所提方法更加简单,可以直接准确得到所有谐振点。

## 5 结 论

新能源并网系统,尤其是多个新能源并网系统,是复杂的高阶系统,准确有效地确定谐振频率以及谐振峰值进而解决谐振问题防止系统过电压是非常关键的一步。通过对系统的分析,得出如下结论:

1) 谐振点系统模态阻抗很大,即使电流很小也会导致很大的系统电压;建立新能源并网系统节点导纳矩阵、采用模态分析法可以快速、准确分析出并网系统存在的谐振点。

2) 单个新能源并网系统中,逆变器侧电感、网侧电感增大将导致系统谐振频率减小、谐波电压增大;滤波电容增大将导致谐振频率减小、谐波电压降低;适当增大控制参数可降低谐波电压;线路阻抗不宜过小,电网阻抗不宜过大。

3) 相同参数时,随着新能源并网数量的增加,系统节点增加,谐振模式随之增加;不同参数时,还会引起高、低频谐振电压都减小。

4) 通过对逆变器参数合理设计、对逆变器类型的合理组合,同时充分考虑接入电网的阻抗参数均可以避免谐振导致的过电压。

### 参考文献

- [1] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等.新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1):1-9.
- [2] 朱锐,黎劲松,杨宝起,等.高比例新能源接入区域电网稳定控制技术探讨[J].电工技术,2021(12):46-49.
- [3] 王超.基于三级协调的高比例新能源并网电压控制[J].电工技术,2021(12):44-45.
- [4] PENG Yelun, SHUAI Zhikang, LIU Xuan, et al. Modeling and stability analysis of inverter-based microgrid under harmonic conditions [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2020,11(2):1330-1342.
- [5] WEN Bo, DONG Dong, BOROYEVICH Dushan, et al. Impedance-based analysis of grid-synchronization stability for three-phase paralleled converters[J].IEEE Transactions on Power Electronics,2015,31(1):26-38.
- [6] LIU Qianyi, LIU Fang, ZOU Runming, et al. Harmonic resonance characteristic of large-scale PV plant: modelling,

analysis, and engineering case[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(3):2359-2368.

- [7] LIU Bin, LI Zhen, ZHANG Xi, et al. Impedance-based analysis of control interactions in weak-grid-tied PMSG wind turbines[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems,2021,11(1):90-98.
- [8] SUN Xiaofeng, ZENG Jian, CHEN Zhe. Site selection strategy of single-frequency tuned R-APF for background harmonic voltage damping in power systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2013,28(1):135-143.
- [9] 聂程,王跃,雷万钧,等.新能源并网输电电缆谐波谐振分析及抑制方法[J].电力系统自动化,2017,41(17):128-133.
- [10] 张兴,余畅舟,刘芳,等.光伏并网多逆变器并联建模及谐振分析[J].中国电机工程学报,2014,34(3):336-345.
- [11] 解宝,周林,郝高峰,等.考虑电网阻抗影响的光伏并网逆变器稳定性与谐振分析及设计[J].中国电机工程学报,2018,38(22):6662-6671.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 王要强,吴凤江,孙力,等.带 LCL 输出滤波器的并网逆变器控制策略研究[J].中国电机工程学报,2011,31(12):34-39.
- [15] 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.
- [16] 李建文,阮筱菲,李永刚,等.弱电网下多 LCL 型并网逆变器谐振模态分析[J].太阳能学报,2021,42(2):346-355.
- [17] 解绍锋,李群湛,赵丽平.谐波国家标准有关问题的探讨[J].电网技术,2006,30(13):94-97.
- [18] SAINZ Luis, CARO Manuel, CARO Eduardo. Analytical study of the series resonance in power systems with the Steinmetz circuit[J].IEEE Transactions on Power Delivery, 2009,24(4):2090-2098.
- [19] 满九方,谢小荣,唐健,等.适用于柔直系统高频谐振分析的输电线路模型[J].电网技术,2021,45(5):1782-1789.

### 作者简介:

邹福强(1991),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统运行与控制;

吴冲(1981),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统运行与控制;

钟帆(1998),男,硕士研究生,研究方向为电能质量。

(收稿日期:2023-02-22)