

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200718

# 多逆变器并网等值建模及谐振抑制优化

王磊, 张凌博

(新能源利用与节能安徽省重点实验室(合肥工业大学), 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 多逆变器并网运行时, 逆变器及电网之间相互影响, 导致并网系统内部发生耦合谐振, 影响系统稳定运行。为了反映多逆变器并网系统谐振特性, 基于单台逆变器并网诺顿模型, 充分考虑了并网系统中各相关部分对多台逆变器并网谐振特性的影响, 建立相应的等值模型, 并详细分析了谐振点的影响因素。通过在控制系统中采用电容串联虚拟电阻对逆变器并网系统的谐振进行抑制, 提出了虚拟电阻阻值的优化取值方法, 并分析了取值与等值模型谐振抑制的效果。最后, 通过仿真验证了所提等值模型和优化取值方法的正确性和有效性。

**关键词:** 多逆变器并网; 等值模型; 谐振; 有源滤波法

## Equivalent modeling of multi-inverters connected to the grid and optimization of resonance suppression

WANG Lei, ZHANG Lingbo

(Anhui Provincial Laboratory of Renewable Energy Utilization and Energy Saving  
(Hefei University of Technology), Hefei 230009, China)

**Abstract:** When multiple inverters are connected to the grid, the interaction between the inverter and the grid results in coupling resonance in the grid connected system. This affects the stable operation of the system. In order to reflect the resonance characteristics of a multi-inverter grid connected system, this paper establishes the corresponding equivalent model which fully considers the influence of relevant parts in the grid connected system on the resonance characteristics of multiple inverters based on single inverter grid connected Norton model. It analyzes the influencing factors on the resonance point in detail. In the control system, the capacitor series virtual resistance is used to suppress the resonance of the grid connected inverter system. The optimal value method of the virtual resistance value is proposed, and the value and the effect of the equivalent model resonance suppression are analyzed. Finally, the correctness and effectiveness of the proposed equivalent model and optimization method are verified by simulation.

This work is supported by the Key Project of Smart Grid Technique and Equipment of National Key Research & Development Program of China (No. 2016YFB0900601), the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52094017000W) and the Regional Innovation and Development Joint Fund of National Natural Science Foundation of China (No. U19A20106).

**Key words:** multi-inverter grid connection; equivalent model; resonance; active filtering method

## 0 引言

逆变器已经成为电力电子化电力系统中的重要组成元件, 为抑制其并网电流电压中的谐波分量, 兼顾低频段增益和高频段衰减优点的 LCL 滤波器在并网逆变器中得到了广泛使用<sup>[1-2]</sup>。然而, 若 LCL

滤波器的固有谐振频率与并网谐波频率接近, 则会严重威胁系统的稳定性。当前, 针对单个 LCL 型并网逆变器的谐振阻尼问题已有较为详细的研究和解决方案<sup>[3]</sup>。文献[4-6]分析了分布式发电并网系统中 LCL 滤波器的多逆变器谐振问题, 并建立 LCL 无源网络模型。文献[7]采用电容电流和并网电流的双反馈控制策略, 文献[8]提出了虚拟阻抗法对系统进行串联和并联阻抗校正, 文献[9]提出了基于滤波电容电压反馈的有源阻尼法, 文献[10-11]中提出的有源阻尼方法可以有效地避免谐振。但上述方法没有

**基金项目:** 国家重点研发计划智能电网技术与装备重点专项(2016YFB0900601); 国家电网公司科技项目(52094017000W); 国家自然科学基金区域创新发展联合基金资助(U19A20106)

充分考虑逆变器之间的耦合。文献[12]提出了一种自抗扰控制方案,并通过根轨迹分析给出了系统参数的设计方法。上述方法实现了单逆变器并网系统等值模型的建立及其谐振的抑制。

在多个逆变器并网系统中,单个逆变器通常采用无隔离变压器的拓扑结构<sup>[13]</sup>,再计及 LCL 滤波器固有的高阶特性,则加剧了逆变器间的耦合,使多逆变器并网系统愈发成为一个更加复杂的高阶网络系统,进一步导致了多逆变器并网系统的谐振<sup>[14]</sup>。文献[15]将逆变器以电流源并联输出阻抗的形式引入无源网络模型中,得到多逆变器并联系统等效阻抗模型。文献[16]将内环电流控制反馈的电流信号除以  $2n$  ( $n$  为逆变器并联台数)建立多逆变器并联等值模型。文献[13]基于 LCL 并网逆变器三阶系统特性提出了有源阻尼并网逆变器模型降阶方法。有源滤波法是目前解决多逆变器并网谐振问题的主要方法之一<sup>[17]</sup>。文献[18]提出一种将逆变器网侧电流作为状态变量的虚拟阻尼法以实现 LCL 滤波器的谐振抑制。文献[19]提出了一种基于虚拟导纳的全局谐振抑制策略。文献[20]提出了一种基于电流下垂控制的改进控制策略。文献[21]提出一种改进的自调节下垂控制策略,抑制了系统无功环流量。文献[22]提出在并网电压比例前馈环节串联二阶广义积分的控制方案。文献[23]建立了微电网多台并联逆变器并网运行的等效耦合电路模型,得到了谐振峰随逆变器数量的增加而变化的分布规律。文献[24]针对三相并网逆变器提出了一种控制策略,利用独特的 abc 框架复系数滤波器和控制器实现了电网电流的均衡、正弦化。文献[25]提出了一种新型三相并网逆变器系统,该系统包括两个逆变器,主逆变器以较低的开关频率将有功功率传输给电网,辅助逆变器输出较低的功率以补偿电网纹波。文献[26]阐述并比较了不同逆变器控制方法的基本原理及其实现方法。但上述模型均不能完整表述多逆变器并网时的全部谐振点,无法详尽分析谐振影响因素,且现有文献均未提出有源滤波法中电容串联虚拟电阻的准确取值方法,影响了多逆变器并网系统等值建模的精度。

本文根据控制方法和电路模型建立了单台逆变器并网诺顿模型,单台逆变器在公共连接点 (Points of Common Connection, PCC) 并联形成多台并网,分析此时单台逆变器受到自身激励、其他并网逆变器激励、电网激励的影响,建立能够反映谐振特性变化的多逆变器并网等值模型,分析谐振点的影响因素。采用电容串联虚拟电阻以抑制谐振,探究虚拟电阻取值与谐振抑制效果间的关系,提出

了优化虚拟电阻阻值取值的方法使抑制效果达到最好,保证了等值模型的精度。最后,仿真验证了所提等值模型和计算方法的正确性和有效性。

## 1 多逆变器系统并网模型

为建立多逆变器并网等值模型,本节将研究单台 LCL 型逆变器并网的诺顿等效电路模型。基于 LCL 滤波器的多逆变器并网系统包括:逆变器及其控制系统、LCL 滤波器、电网电源及等效阻抗。分析多台逆变器并联时,其中每台逆变器受到的影响,修正多台并联对系统谐振点的更改,得到修改后的等值模型。

### 1.1 单逆变器诺顿等效电路

图 1 为单逆变器并网示意图。其中,逆变器控制系统采用传统的基于 PI 控制的逆变侧电流反馈控制和电容电压前馈控制。

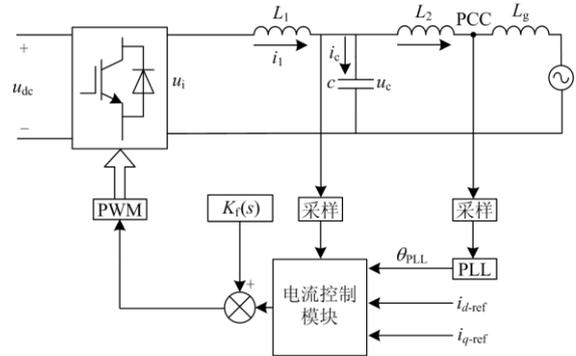


图 1 单个逆变器并网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single inverter grid-connected

图中:  $u_{dc}$  为直流电压;  $u_i$  为逆变器侧输出电压;  $u_g$  为电网电压;  $L_1$  为逆变器侧电感;  $L_2$  为电网侧电感;  $L_g$  为电网电感;  $u_g$  为电网电压;  $i_1$  为  $L_1$  电感电流;  $i_2$  为  $L_2$  电感电流;  $i_g$  为 PCC 点电流;  $C$  为滤波电容器。忽略电感和电容带来的寄生电阻。由图 1 列出以下方程。

$$\begin{cases} u_i(s) - i_1(s)L_1s = u_c(s) \\ u_c(s) - i_2(s)L_2s = u_{pcc}(s) \\ i_1(s) = i_c(s) + i_2(s) \\ i_c(s) = u_c(s)Cs \end{cases} \quad (1)$$

基于 PI 控制器的传统控制方法以电感电流  $i_1$  为电流环控制量,电容电压  $u_c$  作为前馈环节输入量以提高电流环控制带宽。由式(1)和控制策略得到的逆变侧电流环控制策略见图 2 所示。 $K_p$  表示电流 PI 调节器的传递函数。 $H$  为电流反馈系数。

由此得到输出电流的表达式为

$$i_2(s) = G_i i_{ref}(s) - G_g u_{pcc}(s) \quad (2)$$

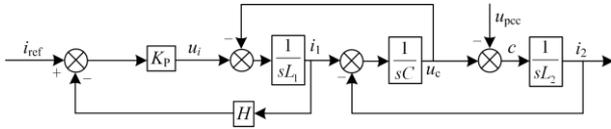


图2 逆变器侧电流控制策略框图

Fig. 2 Diagram of inverter-side current control strategy

式(2)中的传递函数分别为

$$\begin{cases} G_i = \frac{k_p}{D} \\ G_g = \frac{1 + k_p H C s + L_1 C s^2}{D} \\ D = L_1 L_2 C s^3 + k_p H L_2 C s^2 + (L_1 + L_2) s + k_p H \end{cases} \quad (3)$$

式(2)为系统的闭环传递函数,  $D$  为系统特征方程, 由劳斯判据可知该控制系统恒稳定。  $G_i$  表示输出电流指令到实际输出电流的系数,  $G_g$  表示等效导纳, 得到单个逆变器并网的诺顿等效电路模型如图3所示。逆变器侧以交流电流源并联等效导纳表示, 电网侧以交流电压源串联等效导纳表示。

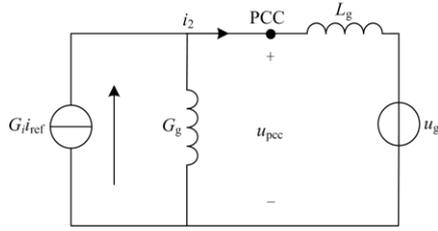


图3 单逆变器并网诺顿等效电路

Fig. 3 Norton equivalent circuit of single inverter grid-connected

## 1.2 多逆变器并网等值模型

由单逆变器在 PCC 汇集而成的多逆变器并网系统如图4所示。单逆变器输出并网电流为  $i_2$ ,  $i_g$  为并联后多逆变器并网电流,  $u_g$  为电网电压,  $L_g$  为电网线路感抗。

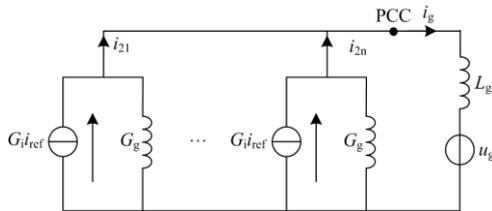


图4 多逆变器并网等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of multi-inverter grid-connected

并网电压  $u_{pcc}$  可表示为

$$u_{pcc} = \frac{G_i L_g s}{1 + n G_g L_g s} i_{ref1} + \sum_{i=2}^n \frac{G_i L_g s}{1 + n G_g L_g s} i_{refi} + \frac{1}{1 + n G_g L_g s} u_g \quad (4)$$

式中:  $i_{ref1}$  为第一台逆变器指令电流;  $i_{refi}$  为其他逆变器指令电流。假设逆变器参数均相同, 将式(4)代入式(2)中得到  $N$  台逆变器并联时单个逆变器的输出并网电流  $i_{21}$  为

$$i_{21}(s) = \left( G_i - \frac{G_i G_g L_g s}{1 + n G_g L_g s} \right) i_{ref1}(s) - \sum_{i=2}^n \frac{G_i L_g s}{1 + n G_g L_g s} i_{refi}(s) - \frac{G_g}{1 + n G_g L_g s} u_g(s) \quad (5)$$

将指令电流系数用  $G_{in}$  表示, 等效导纳由  $G_{gn}$  表示, 方程(5)更新为

$$i_{21}(s) = G_{in} i_{ref1}(s) - G_{on} i_{refi}(s) - G_{gn} u_g(s) \quad (6)$$

$$\begin{cases} G_{in} = G_i - \frac{G_i G_g L_g s}{1 + n G_g L_g s} \\ G_{gn} = \frac{G_g}{1 + n G_g L_g s} \\ G_{on} = \sum_{i=2}^n \frac{G_i L_g s}{1 + n G_g L_g s} \end{cases} \quad (7)$$

式(6)表明多逆变器并网时, 第一个逆变器的输出并网电流与自身激励、其他逆变器激励和电网电压激励的关系。在各逆变器指令电流相等情况下,  $N$  台逆变器并联并网等值模型如图5所示。

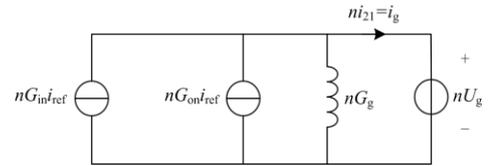


图5 多逆变器并网等值模型

Fig. 5 Equivalent model of multi-inverter grid-connected

## 2 多逆变器并网系统谐振特性分析

### 2.1 谐振特性分析

为将并网电流谐波变量控制在规定的范围内, 考虑系统的功耗问题和各种约束条件, 并网系统参数如表1所示。

表1 系统工作参数

Table 1 Parameters of system

参数	数值
逆变器侧电感 $L_1$ /mH	15
滤波电容 $C$ /μF	100
电网相电压 $U_g$ /V	220
网侧电感 $L_2$ /mH	1
电网等效阻抗 $L_g$ /mH	0.1
直流母线电压 $U_{dc}$ /V	600

对式(6)进行伯德图分析, 电流参考值  $i_{ref}$  到输出并网电流  $i_{21}$  的指令电流系数  $G_{in}$  的幅频特性曲线如图 6 所示。其他并联逆变器的输出指令电流到第一台逆变器的输出并网电流系数  $G_{on}$  的幅频特性曲线如图 7 所示。电网电压  $u_g$  到输出并网电流  $i_{21}$  的等效导纳系数  $G_{gn}$  的幅频特性曲线如图 8 所示。

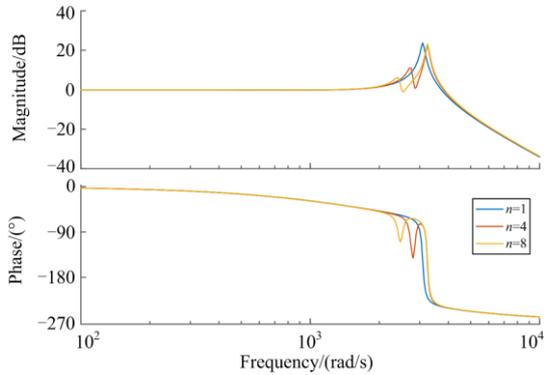


图 6  $G_{in}$  的幅频特性曲线  
Fig. 6 Bode plot of  $G_{in}$

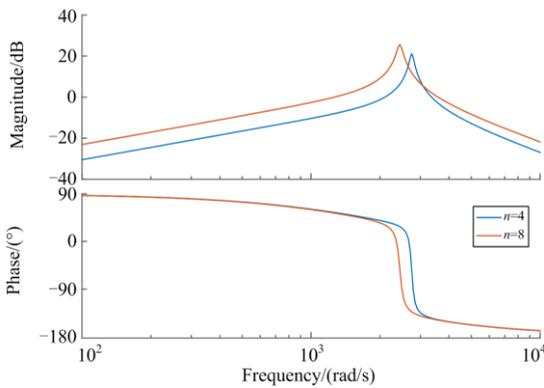


图 7  $G_{on}$  的幅频特性曲线  
Fig. 7 Bode plot of  $G_{on}$

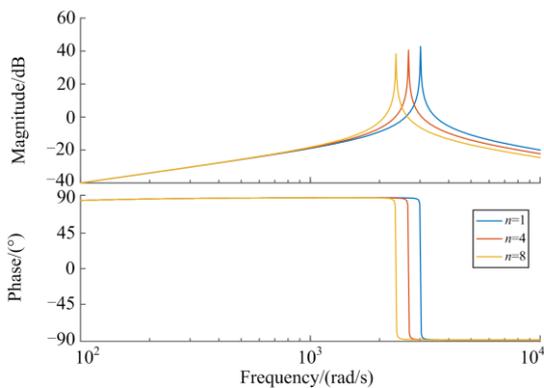


图 8  $G_{gn}$  的幅频特性曲线  
Fig. 8 Bode plot of  $G_{gn}$

$N$  分别取 1、4、8 台逆变器并网时, 指令电流系数  $G_{in}$  的幅频特性曲线如图 6 所示。单台逆变器并网只有一个谐振峰, 电网等效电感相当于与网侧电感串联, 该谐振峰属于 LCL 型滤波器本身引起的逆变器谐振。多台逆变器并联并网后, 并网谐振频率受到逆变器并联台数和电网等效阻抗的共同影响, 在 LCL 型滤波器固有谐振点外, 还产生了一个正谐振峰和一个负谐振峰。在系统参数一定的情况下, 随着并联台数  $N$  的增加, PCC 点电流成倍增加, 电网等效阻抗发生改变, 谐振点逐渐向低频段靠近。当改变后的谐振频率与输出电路中因锁相环、脉宽调制等环节引入的谐波分量频率接近时, 将引发谐振, 威胁到系统的安全稳定运行。

其他逆变器的激励源在第一台逆变器中引起的谐振点如图 7 所示, 由图 7 可见, 第一台逆变器并网电流存在两个谐振点, 但其中一个谐振点是固定的, 由其他并联 LCL 型滤波器参数决定。另外一个谐振点取决于并联逆变器的台数, 随着台数的增加, 谐振点向低频段移动。

电网中的谐波分量也将使第一台逆变器的输出电流产生谐振点, 由式(4)可知, 该谐振频率与输出电流指令对输出并网电流激励的谐振频率完全相等。且随着并联并网逆变器台数  $N$  的增加, 谐振点逐渐向低频段移动。另外,  $N$  增加的同时, 变流器的分流作用也加强, 谐振峰的峰值随之减小。

## 2.2 谐振频率点计算

在上文对多逆变器并网系统传递函数研究的基础上, 本小节开展了谐振频率的分析计算。

设  $N$  台并网逆变器的参数一致, 研究第一台逆变器的电压源对其自身并网电流的激励, 仅保留第一台逆变器的电压源, 得到谐振电路如图 9 所示。为方便计算, 已将参数转换为复频域形式。

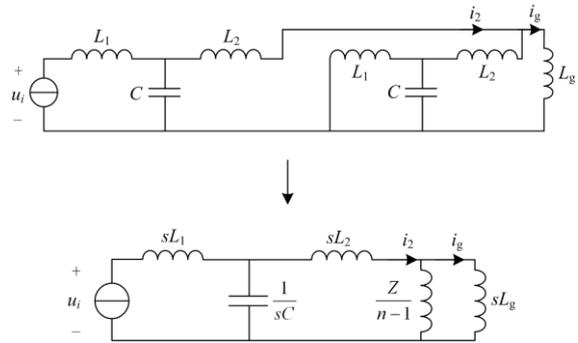


图 9 谐振电路图

Fig. 9 Diagram of resonance circuit

图 9 中  $Z/(n-1)$  表示除第一台外, 余下  $n-1$  台并联 LCL 型滤波器的等效阻抗(即  $L_1$  与  $C$  并联再与  $L_2$

串联), 得到如下表达式:

$$i_2 = \frac{u_i}{\left(\frac{Z}{n-1} // sL_g + sL_2\right) // \frac{1}{sC} + sL_1} \cdot \frac{1}{\frac{Z}{n-1} // sL_g + sL_2 + \frac{1}{sC}} \quad (8)$$

$$\frac{i_2}{u_i} = \frac{1}{\left(\frac{Z}{n-1} // sL_g + sL_2\right) // \frac{1}{sC} + sL_1} \cdot \frac{1}{\frac{Z}{n-1} // sL_g + sL_2 + \frac{1}{sC}} = \frac{1}{(L_1 + L_2) + s^2 L_1 L_2 C} \cdot \frac{1}{[L_1 + L_2 + (n-1)L_g] + s^2 [L_1 L_2 C + (n-1)L_g L_1 C]} \cdot \frac{1}{s[(L_1 + L_2 + nL_g) + s^2 (L_1 L_2 C + nL_g L_1 C)]} \quad (9)$$

由式(9)可见, 该系统中存在两个正谐振峰和一个负谐振峰, 令  $s=j\omega$ , 计算谐振频率为

$$\begin{cases} \omega_1^+ = \sqrt{\frac{1}{L_1 C} \left(1 + \frac{L_1}{L_2}\right)} \\ \omega_2^+ = \sqrt{\frac{1}{L_1 C} \left(1 + \frac{L_1}{L_2 + nL_g}\right)} \\ \omega_1^- = \sqrt{\frac{1}{L_1 C} \left(1 + \frac{L_1}{L_2 + (n-1)L_g}\right)} \end{cases} \quad (10)$$

式(10)得到的谐振点与上节中系统闭环模型幅频特性曲线是相吻合的。 $\omega_1^+$  为 LCL 型滤波器的自身频率, 只与其参数相关。 $\omega_1^+$  和  $\omega_1^-$  则不仅与滤波器自身参数有关, 还与并联台数和电网等效阻抗相关。当仅有一台逆变器并网时, 系统谐振频率保持不变, 随着并联台数的增加, 电网等效阻抗对系统谐振点的影响逐渐增大。且电网等效阻抗的值越大, 并联台数对系统的影响也越大。当并联台数较多或电网等效阻抗很大时, 正负谐振点  $\omega_2^+$  和  $\omega_1^-$  谐振频率几乎重合。并联台数和电网等效阻抗的增加, 会加速谐振频率点的下移, 威胁系统的稳定运行。图 10 为表 1 参数下 ( $L_g$  值确定) 并联逆变器台数和谐振

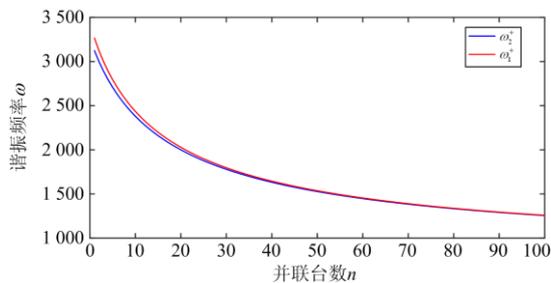


图 10 并联台数与谐振点关系曲线

Fig. 10 Relationship between number of parallel units and resonance point

频率的关系图。随着并联台数的增大,  $\omega_2^+$  和  $\omega_1^-$  正负频率点逐渐趋于相同。

### 3 有源阻尼法定量计算

#### 3.1 谐振抑制方法

由以上分析可知, 基于 LCL 滤波器的多逆变器并网系统存在三个谐振点, 分别为滤波器自身谐振点  $\omega_1^+$  和并网时由其他逆变器以及电网对单逆变器输出电流造成的两个谐振点  $\omega_2^+$  和  $\omega_1^-$ 。一般采用无源阻尼法和有源阻尼法抑制谐振。无源阻尼法是在逆变器中增加阻尼电阻抑制系统谐振, 虽然可以达到较好的抑制效果, 但会带来额外的损耗。有源阻尼法在控制系统中采用电容串联虚拟电阻的方式对谐振进行抑制, 保证了谐振抑制的效果, 且不会带来额外的功率损耗。

电容串联虚拟电阻后, 只需在方程(1)电容支路电流等式中添加电阻  $R$  值, 即可将式(2)、式(3)更新为

$$i_2(s) = G_{ir} i_{ref}(s) - G_{gr} u_{pcc}(s) \quad (11)$$

$$\begin{cases} G_{ir} = \frac{k_p RCs + k_p}{D_r} \\ G_{gr} = \frac{1 + k_p HC s + RCs + L_1 C s^2}{D_r} \\ D_r = L_1 L_2 C s^3 + (Hk_p L_2 C + RL_2 C + RL_1 C) s^2 + (L_1 + L_2 + Hk_p RC) s + Hk_p \end{cases} \quad (12)$$

#### 3.2 串联虚拟电阻定量计算

多逆变器经串联虚拟电阻并网时, 其并网方程(6)、(7)更新为

$$\begin{cases} G_{inr} = G_{ir} - \frac{G_{ir} G_{gr} L_g s}{1 + n G_{gr} L_g s} \\ G_{onr} = \sum_{i=2}^n \frac{G_{ir} G_{gr} L_g s}{1 + n G_{gr} L_g s} \\ G_{gnr} = \frac{G_{gr}}{1 + n G_{gr} L_g s} \end{cases} \quad (13)$$

$$i_{21}(s) = G_{inr} i_{ref1}(s) - G_{onr} i_{refi}(s) - G_{gnr} u_g(s) \quad (14)$$

式(14)为谐振抑制情况下的电路等值模型。在电容串联虚拟电阻情况下, 输出指令电流  $i_{ref}$  到输出并网电流  $i_{21}$  的系数  $G_{inr}$  幅频特性曲线与串联电阻阻值的关系如图 11。其他并联逆变器的输出指令电流  $i_{ref}$  到第一台逆变器的输出并网电流  $i_{21}$  的幅频特性曲线串联电阻阻值的关系如图 12。电网电压  $u_g$  到输出并网电流  $i_{21}$  的系数  $G_{gnr}$  幅频特性曲线与串联电阻阻值的关系如图 13。

加入串联虚拟电阻，谐振峰值得到抑制，随着电阻阻值的增加，抑制作用也随之加强，并且对 LCL 型滤波器的高频抑制能力没有太大影响。

从图 12 可知，其他并网逆变器对第一台逆变器造成的的谐振影响随着串联虚拟电阻阻值的增加，逐渐变弱，谐振峰越来越光滑。

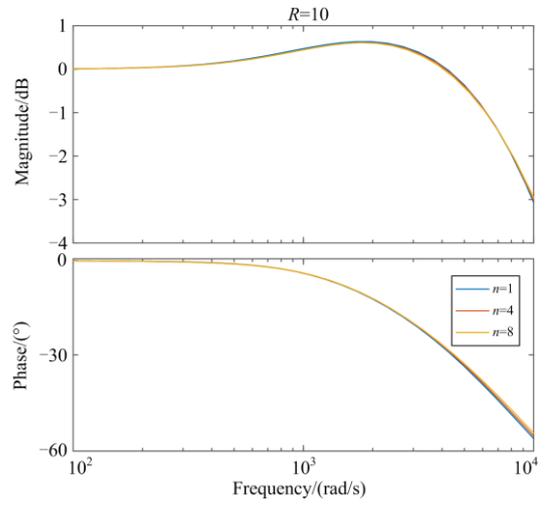
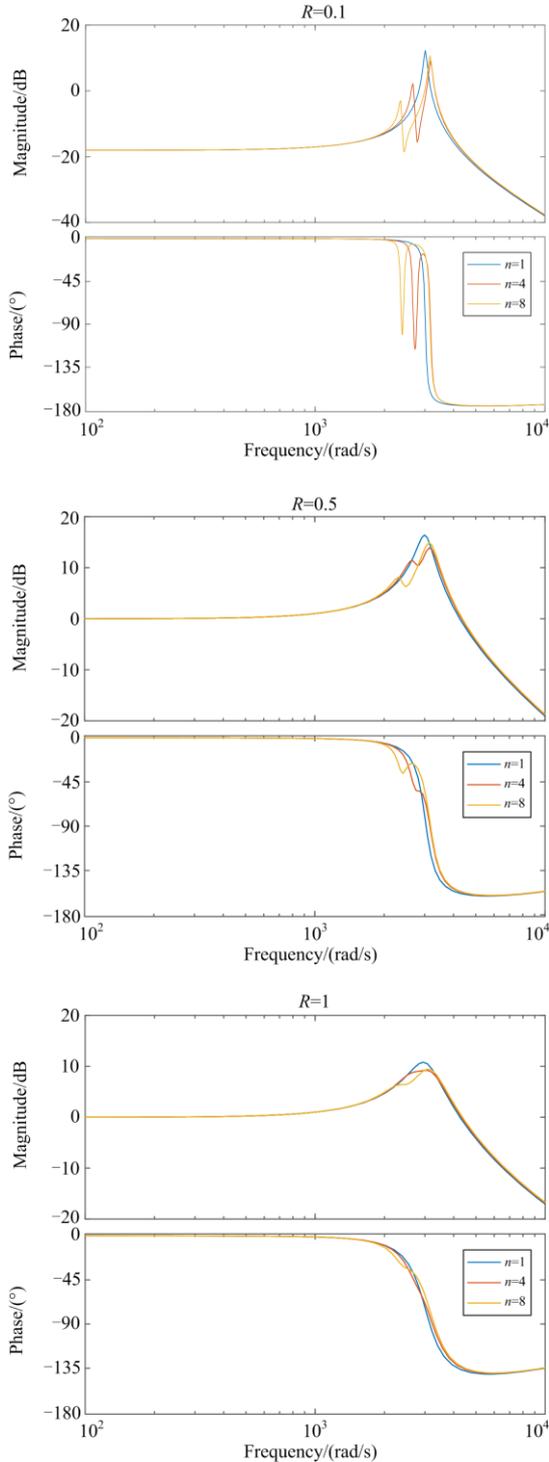
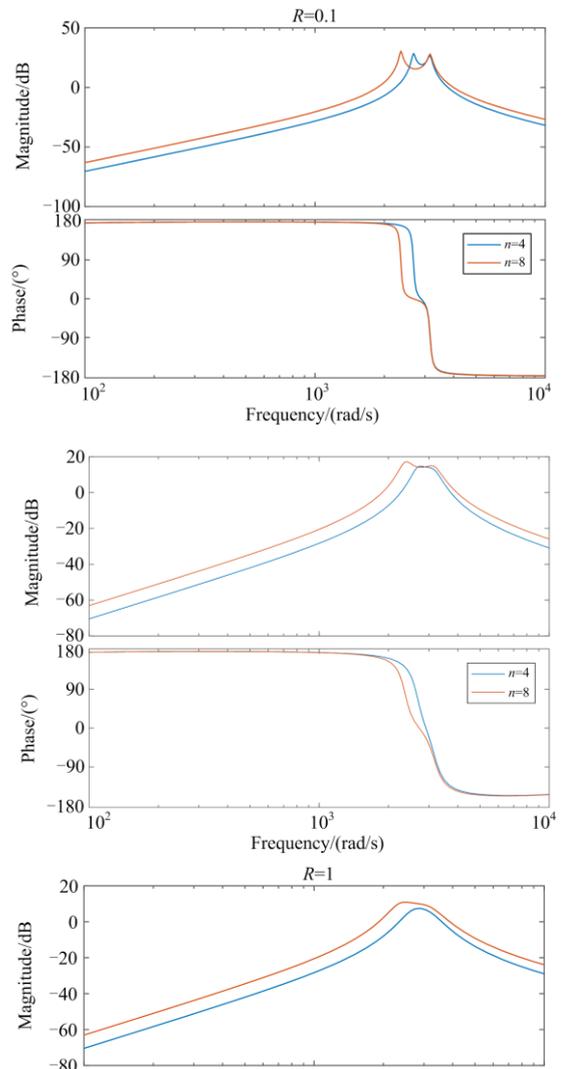


图 11  $G_{inr}$  幅频特性曲线与串联电阻关系  
Fig. 11 Bode plot of  $G_{inr}$  vs. series resistance



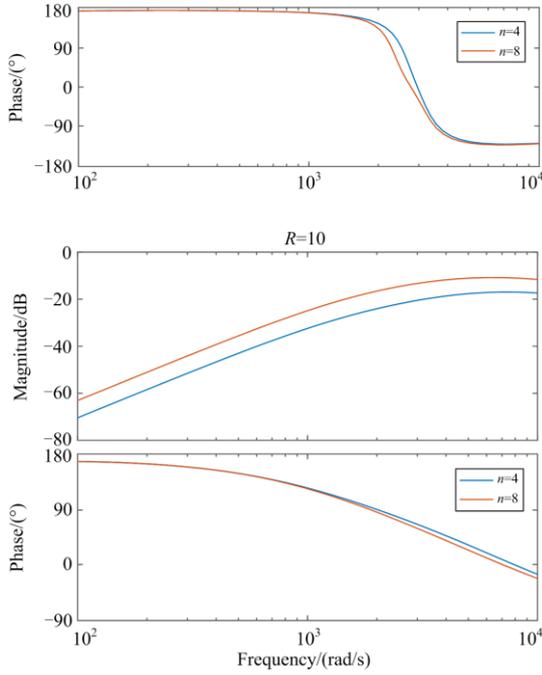


图 12  $G_{onr}$  幅频特性曲线与串联电阻关系  
Fig. 12 Bode plot of  $G_{onr}$  vs. series resistance

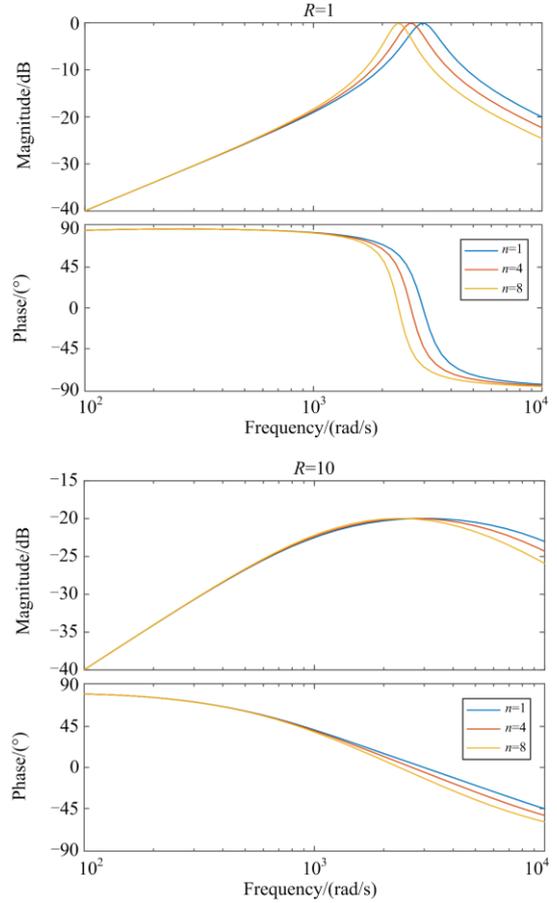
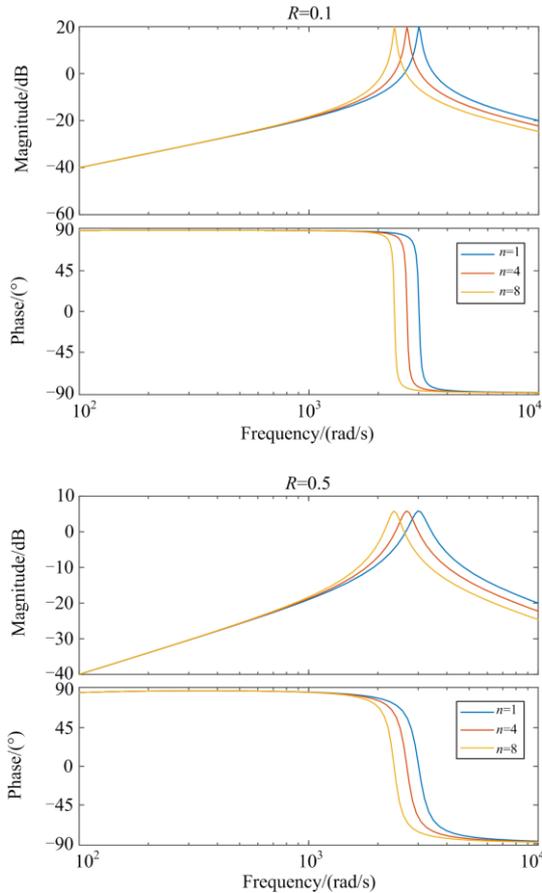


图 13  $G_{gnr}$  幅频特性曲线与串联电阻关系  
Fig. 13 Bode plot of  $G_{gnr}$  vs. series resistance

由图 13 可见, 电网电压激励的谐振峰值也随着电阻阻值的增加而得到有效的抑制。

为了使并网电流紧紧跟随指令电流, 并抑制谐振, 需要优化串联虚拟电阻值, 使其满足式(15)。

$$\begin{cases} G_{inr} = G_{ir} - \frac{G_{ir}G_{gr}L_g s}{1 + nG_{gr}L_g s} = 1 \\ G_{onr} = \sum_{i=2}^n \frac{G_{ir}G_{gr}L_g s}{1 + nG_{gr}L_g s} = 0 \end{cases} \quad (15)$$

从图 14 中看出, 两个系数分别在 1、0 附近小幅度变化。此时, 假设每台逆变器的输出指令电流相等, 式(15)可简化为式(16)。

$$\begin{cases} G_{inr} - G_{onr} = G_{ir} - \frac{G_{ir}G_{gr}L_g s}{1 + nG_{gr}L_g s} - \frac{(n-1)G_{ir}G_{gr}L_g s}{1 + nG_{gr}L_g s} = 1 \\ Z = G_{inv} - G_{our} \end{cases} \quad (16)$$

以上节中 8 台逆变器并联为例, 其余参数按照表 1 设置, 计算串联虚拟电阻值为 186  $\Omega$ , 幅频特性曲线如图 16 所示。

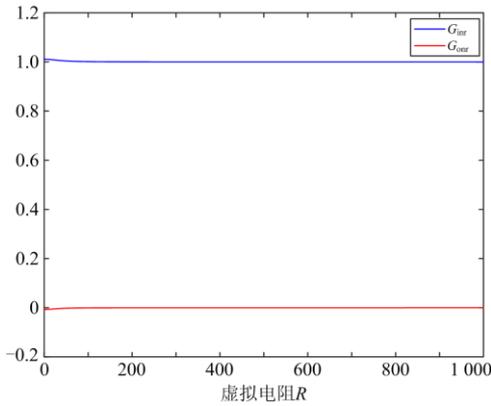


图 14  $G_{inr}$ 、 $G_{onr}$  与虚拟电阻取值关系

Fig. 14 Relationship between virtual resistance and  $G_{inr}$ 、 $G_{onr}$

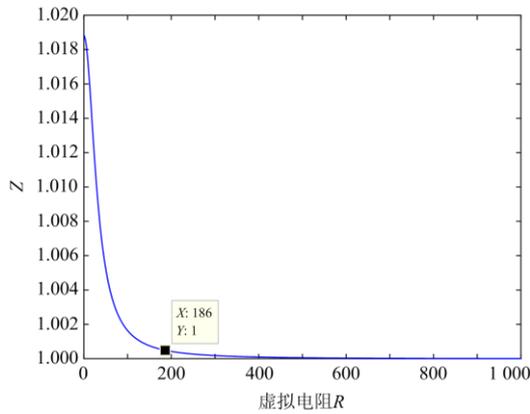


图 15 电阻取值优化

Fig. 15 Resistance value optimization

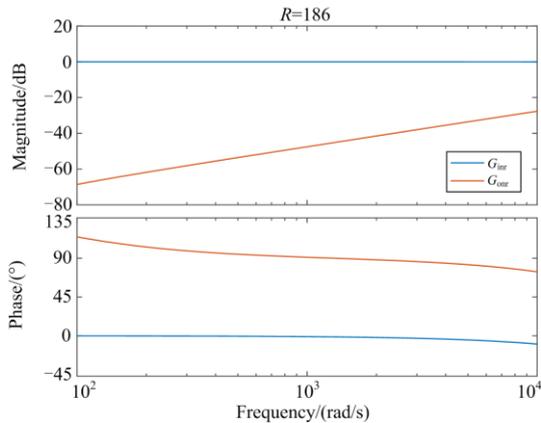


图 16 串联虚拟电阻最优取值时伯德图

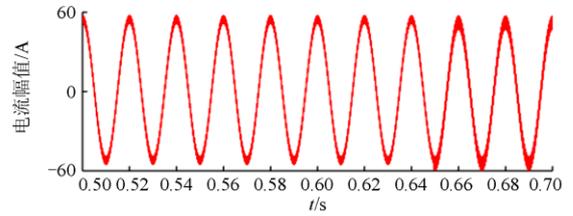
Fig. 16 Bode plot of optimal value of series virtual resistance

### 4 仿真验证

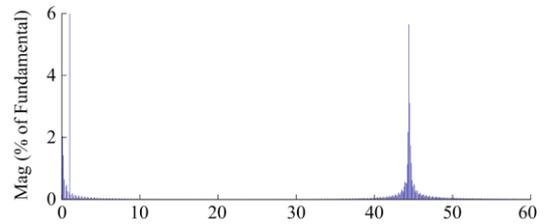
为验证本文所提逆变器等值模型和谐振抑制策略定量计算的有效性，设计了典型工况下的仿真

算例。在 Matalb/Simulink 平台上搭建了基于表 1 参数的多逆变器并网系统仿真模型，分析其并网谐振特性及谐振抑制策略。指令电流为 50 A，频率为 50 Hz。

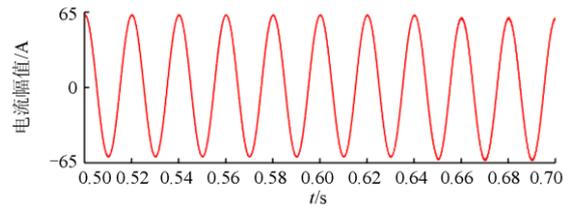
首先，对于未引入有源滤波法定量计算的系统，分别取 1、4、8 台逆变器并联，分析谐振特性和等值模型的有效性。仿真结果如图 17—图 19 所示。



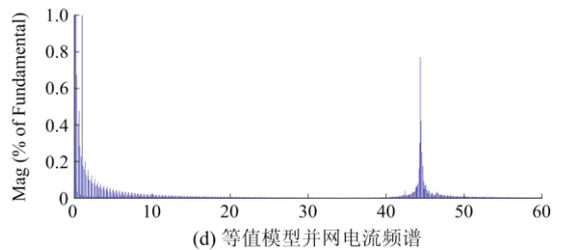
(a) 单机并网电流



(b) 单机并网电流频谱



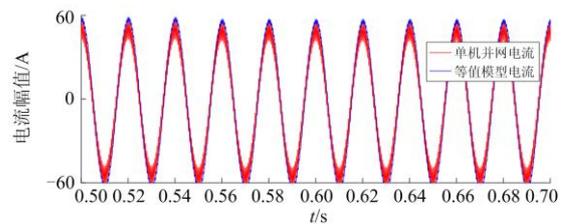
(c) 等值模型并网电流



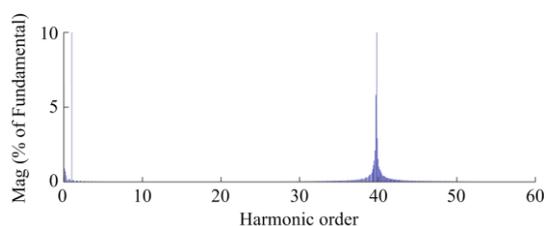
(d) 等值模型并网电流频谱

图 17 单逆变器并网

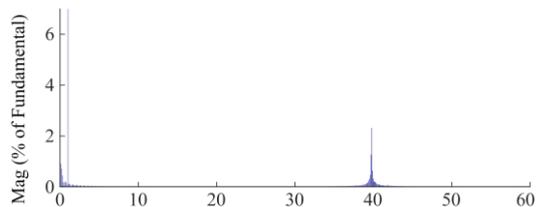
Fig. 17 Single inverter grid-connected



(a) 单机并网电流与等值模型并网电流



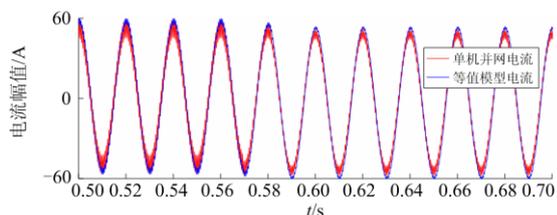
(b) 单机并网电流频谱



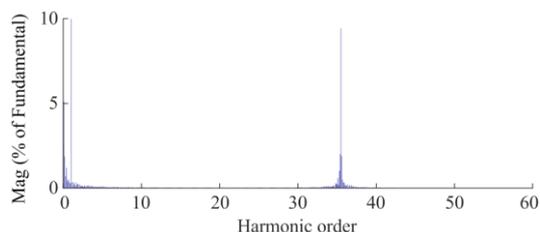
(c) 等值模型并网电流

图 18 4 台逆变器并网

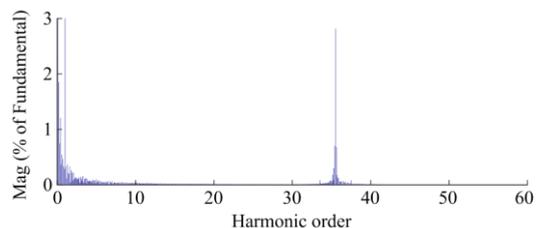
Fig. 18 Four inverters grid-connected



(a) 单机并网电流与等值模型并网电流



(b) 单机并网电流频谱



(c) 等值模型并网电流频谱

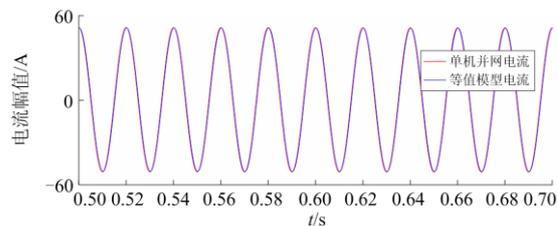
图 19 8 台逆变器并网

Fig. 19 Eight inverters grid-connected

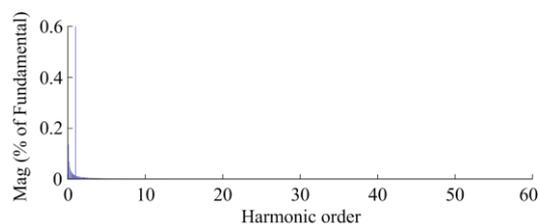
从上图分析可知, 由于控制环节引入谐波, 实际模型中存在着电流谐振的问题, 等值模型能够较好地反映实际并网电流中的谐振特性, 使并网电流跟随电流指令值, 但只能反映实际模型的谐振变化趋势, 并不能反映谐振幅度的变化。

采用本文所提的谐振抑制策略定量计算, 根据

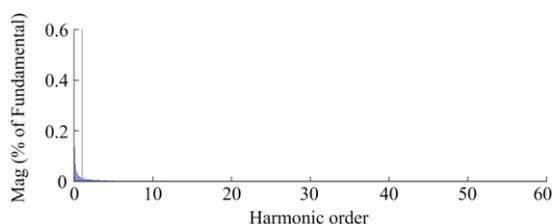
式(16)的计算结果, 取 8 台逆变器并网的情况, 在实际模型和等值模型中均引入串联虚拟电阻, 谐振特性分析和等值模型仿真结果如图 20。



(a) 单机并网电流与等值模型并网电流



(b) 单机并网电流频谱



(c) 等值模型并网电流

图 20 8 台逆变器串联虚拟电阻并网

Fig. 20 Eight inverters grid-connected in series with virtual resistors

串联虚拟电阻后, 电路谐振得到了良好的抑制, 系统能够保持稳定运行, 并且能在计算的电阻最优取值处取得最好效果。

在实际电力系统中存在着大量的单相负载以及系统故障, 会导致三相电网电压的幅值和相位不相同, 即三相电网电压不平衡。一般而言, 产生三相电网电压不平衡的原因主要分为两种: 事故性和正常性。其中, 事故性是指由系统故障引起的包括单相、两相断线以及单相接地等。对于此类故障, 并网逆变器不能立刻与电网脱离, 需保持运行状态甚至要能够支撑电网直至故障排除, 即具有故障电压穿越能力。本文设计了三相短路故障(如图 21、图 22)来模拟暂态情况, 故障情况下算法依然能紧紧跟随系统的变动, 迅速反映系统暂态过程电流的变化, 验证了所建立等效模型在暂稳态情况下都具备良好的有效性、及时性和准确性。

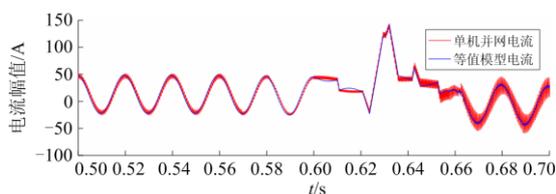


图 21 8 台逆变器并网三相接地故障

Fig. 21 Eight inverters grid-connected and three-phase ground fault

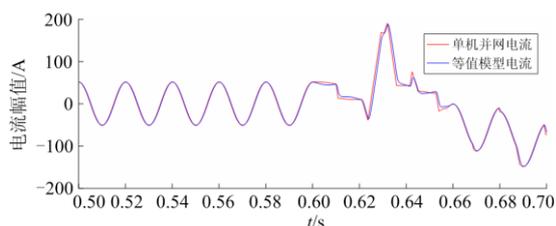


图 22 8 台逆变器串联虚拟电阻并网三相接地故障

Fig. 22 Eight inverters grid-connected in series with virtual resistors and three-phase ground fault

## 5 结语

针对逆变器并联并网时控制环节引入谐波,造成系统谐振问题,研究逆变器单台以及多台并网时的谐振特性,提出考虑了全部谐振点的等值模型,来模拟系统运行。并定量计算了有源滤波法的谐振抑制策略,提供了最佳取值的方法。最后仿真验证了所提模型及方法的正确性和有效性。

## 参考文献

- [1] 赵清林, 郭小强, 邬伟扬. 单相逆变器并网控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(16): 60-64.  
ZHAO Qinglin, GUO Xiaoqiang, WU Weiyang. Research on control strategy for single-phase grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(16): 60-64.
- [2] 武志恒, 张杰, 廖敏夫, 等. 四断口小组滤波器断路器均压措施研究[J]. 高压电器, 2019, 55(7): 56-62.  
WU Zhiheng, ZHANG Jie, LIAO Minfu, et al. Research on voltage-sharing measures of quadruple-break group filter circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(7): 56-62.
- [3] 郭伟峰, 徐殿国, 武健, 等. LCL 有源电力滤波器新型控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(3): 42-48.  
GUO Weifeng, XU Dianguo, WU Jian, et al. Novel control method for LCL active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(3): 42-48.
- [4] ENSLIN J H R, HESKES P J M. Harmonic interaction between a large number of distributed power inverters

and the distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(6): 1586-1593.

- [5] 张战彬, 翟红霞, 徐华博, 等. 光伏电站多逆变器并网系统输出谐波研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 142-146.  
ZHANG Zhanbin, ZHAI Hongxia, XU Huabo, et al. Study on output harmonic of multi-inverter grid-connected in photovoltaic plant[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 142-146.
- [6] AGORRETA J L, BORREGA M, LÓPEZ J, et al. Modeling and control of N-paralleled grid-connected inverters with LCL filter coupled due to grid impedance in PV plants[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3-4): 770-785.
- [7] 徐志英, 许爱国, 谢少军. 采用 LCL 滤波器的并网逆变器双闭环网电流控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27): 36-41.  
XU Zhiying, XU Aiguo, XIE Shaojun. Dual-loop grid current control technique for grid-connected inverter using an LCL filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(27): 36-41.
- [8] YANG D, RUAN X, WU H. Impedance shaping of the grid-connected inverter with LCL filter to improve its adaptability to the weak grid condition[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 642-653.
- [9] MALINOWSKI M, BERNET S. A simple voltage sensorless active damping scheme for three-phase PWM converters with an LCL filter[J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2008, 55(4): 1876-1880.
- [10] 潘冬华, 阮新波, 王学华, 等. 提高 LCL 型并网逆变器鲁棒性的电容电流即时反馈有源阻尼方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 1-10.  
PAN Donghua, RUAN Xinbo, WANG Xuehua, et al. A capacitor-current real-time feedback active damping method for improving robustness of the LCL-type grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(18): 1-10.
- [11] LÜ Yongcan, LIN Hua, YANG Huacheng, et al. Decouple design of current loop parameters for PWM converters based on multi-resonant controllers and capacitor current feedback active damping[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 32(27): 44-51.
- [12] MA W, GUAN Y, ZHANG B, et al. Active disturbance rejection control based single current feedback resonance damping strategy for LCL-type grid-connected inverter[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(1): 48-62.
- [13] DANNEHL J, WESSELS C, FUCHS F W. Limitations of

- voltage-oriented PI current control of grid-connected PWM rectifiers with LCL filters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(2): 380-388.
- [14] TWINING E, HOLMES D G. Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(3): 888-895.
- [15] LU X, LISERRE M, SUN K, et al. Resonance propagation of parallel-operated DC-AC converters with LCL filters[C] // 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), February 5-9, 2012, Orlando, FL, USA: 877-884.
- [16] 闫凯, 张保会, 瞿继平, 等. 光伏发电系统暂态建模与等值[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 1-8.  
YAN Kai, ZHANG Baohui, QU Jiping, et al. Photovoltaic power system transient modeling and equivalents[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 1-8.
- [17] 曾正, 李辉, 冉立. 交流微电网逆变器控制策略述评[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(9): 142-151.  
ZENG Zheng, LI Hui, RAN Li. Comparison on control strategies of inverters in AC microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(9): 142-151.
- [18] 钟庆, 冯俊杰, 王钢, 等. 含多电压源型换流器配电网高频谐振特性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 99-105.  
ZHONG Qing, FENG Junjie, WANG Gang, et al. Analysis on high frequency resonance characteristics of distribution network with multiple source converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 99-105.
- [19] 胡伟, 周友斌, 杜镇安, 等. 多并网逆变器系统谐振抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 45-50.  
HU Wei, ZHOU Youbin, DU Zhen'an, et al. Research on resonance suppression strategy of system with multiple grid-connected inverters[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 45-50.
- [20] 樊梦蝶, 曾成碧, 苗虹. 微网逆变器无功出力按容量分配的改进控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 100-107.  
FAN Mengdie, ZENG Chengbi, MIAO Hong. Improved control strategy of reactive power distribution according to capacity of micro grid inverter[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 100-107.
- [21] 柏管, 陈卓, 刘飞. 基于自调节下垂控制的分布式电源并联运行技术[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 120-126.  
BO Guan, CHEN Zhuo, LIU Fei. Parallel operation technology of distributed generation based on self-regulation droop control[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 120-126.
- [22] 郑征, 黄旭, 杨明, 等. 弱电网下逆变侧电流反馈的并网逆变器稳定性分析及优化[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 31-37.  
ZHENG Zheng, HUANG Xu, YANG Ming, et al. Stability analysis and improvement for LCL filter grid-connected inverter using inverter-side current feedback[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 31-37.
- [23] CHEN Zhiyong, CHEN Yandong, GUERRERO J M, et al. Generalized coupling resonance modeling, analysis, and active damping of multi-parallel inverters in microgrid operating in grid-connected mode[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(1): 63-75.
- [24] GUO Xiaoqiang, GUERRERO J M. Abc-frame complex-coefficient filter and controller based current harmonic elimination strategy for three-phase grid connected inverter[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(1): 87-93.
- [25] ISEN E, BAKAN A F. Highly efficient three-phase grid-connected parallel inverter system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(5): 1079-1089.
- [26] GUO Wenming, MU Longhua. Control principles of micro-source inverters used in microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 56-62. DOI: 10.1186/s41601-016-0019-8.

收稿日期: 2020-06-24; 修回日期: 2020-09-14

作者简介:

王磊(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源及其应用、柔性输电系统仿真与控制; E-mail: wanglei223@hfut.edu.cn

张凌博(1997—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电系统并网建模及谐振耦合研究。E-mail: 309943691@qq.com

(编辑 姜新丽)