

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190585

# 基于RGA和 $\alpha\beta$ 坐标系的直驱风场内机组间谐波交互分析

韩平平, 汪龙建, 窦盛, 王磊

(安徽省新能源利用与节能省级实验室(合肥工业大学), 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 针对直驱风场内各机组电流控制回路间的谐波交互特性展开研究。基于 $\alpha\beta$ 坐标系, 采用准比例谐振控制(Quasi-Proportional Resonance, QPR)跟踪风机输入参考电流。考虑逆变器数字延时、附加电容电流反馈有源阻尼抑制LCL固有谐振, 结合风场拓扑结构, 建立直驱风场多输入多输出传递函数矩阵模型。基于相对增益矩阵(Relative Gain Array, RGA)原理, 定量地分析了不同控制参数、等效电网电感及并网风机台数对各机组电流控制回路间谐波交互作用的影响规律。分别在Matlab/Simulink软件和StarSim+PXI硬件在环实时仿真平台上搭建了直驱风场并网模型, 仿真和实验结果验证了机组间谐波交互作用分析方法及结果的有效性和正确性。

**关键词:** 谐波交互特性;  $\alpha\beta$ 坐标系; QPR; RGA; 硬件在环实时仿真

## Analysis of harmonic interaction between internal units of direct drive wind farm based on RGA and $\alpha\beta$ coordinate system

HAN Pingping, WANG Longjian, DOU Sheng, WANG Lei

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

**Abstract:** Harmonic interaction characteristics between current control loops of different units in the direct drive wind farm are studied. Based on  $\alpha\beta$  coordinate system, the Quasi-Proportional Resonance (QPR) controller is used to track the input reference current of the direct drive wind turbine. Considering the digital delay of the inverter, the capacitive current feedback active damping is used to suppress the natural resonance of the LCL filter. Combined with the wind farm topology, a multi-input and multi-output transfer function matrix model of the direct drive wind farm is established. Based on the principle of Relative Gain Array (RGA), the influence of different control parameters, equivalent grid inductance and the number of grid-connected units on the harmonic interaction between the current control loops of direct drive wind turbines in the direct drive wind farm is quantitatively analyzed. The direct drive wind farm model is respectively built on Matlab/Simulink software and StarSim+PXI hardware-in-the-loop real-time simulation platform. Simulation and experimental results verify the validity and correctness of the harmonic interaction analysis method and results.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52094017000W).

**Key words:** harmonic interaction characteristics;  $\alpha\beta$  coordinate system; quasi-proportional resonance (QPR); relative gain array (RGA); hardware-in-the-loop real-time simulation

## 0 引言

近年来, 直驱风机以其无齿轮箱、故障率低及发电效率高等诸多优点得到了广泛应用, 被认为是今后兆瓦级大功率变速恒频电机型中最有前途的发展对象<sup>[1-12]</sup>。然而, 直驱风场多机并网运行时, 各机组控制回路间因电网阻抗的存在会发生谐波交

互作用, 恶化风场输出的电能质量, 对风场正常生产运行造成不良影响。因此, 有必要深入分析直驱风场内机组间的谐波交互作用特性<sup>[13-14]</sup>。

直驱风机通过背靠背变流器并网, 其电机部分和电网通过直流电容解耦, 因而, 直驱风场内机组间的谐波交互主要体现在并网逆变器之间。

目前有关直驱风机间(或并网逆变器间)交互作用的研究, 可分为定性分析和定量分析两类。定性分析通过建立多机并网传递函数矩阵, 根据传递函数矩阵非对角元素是否为零来判断机组间有无交互



分别为基波角频率和谐振带宽。当电网频率为 50 Hz 时, 最大频率偏差允许范围是 0.5 Hz。为保证电网频率偏离 50 Hz 时电流调节器仍有较大增益, 取谐振项系数为  $\omega_c = 2\pi \cdot 0.5 = \pi \text{ rad/s}$ 。

## (2) PWM 逆变器传递函数

PWM 逆变器在进行数字控制时, 零阶保持器和采样环节会产生 1.5 拍采样延时, 这使得电容电流反馈等效为在滤波电容上并联阻抗。该阻抗不仅会阻尼谐振峰, 还会改变 LCL 谐振频率<sup>[23]</sup>, 因此逆变器数字延时不可忽略。逆变器模块传递函数为

$$G_{\text{pwm}}(s) = k_{\text{pwm}} \cdot e^{-1.5sT_s} \quad (2)$$

式中:  $T_s$  为开关周期;  $k_{\text{pwm}}$  为逆变器等效增益, 表达式为  $k_{\text{pwm}} = U_{\text{dc}} / U_{\text{tri}}$ , 其中  $U_{\text{dc}}$  为直流侧电压,  $U_{\text{tri}}$  为三角载波幅值。

## (3) 直驱风机传递函数及诺顿等效电路

由梅森定理, 将图 2 简化为如图 3 所示, 可得直驱风机输出电流  $i_g$ 、输入参考电流  $i_g^*$  和并网点电压  $u_{\text{pcc}}$  之间的关系式为

$$i_g = s \frac{G_1(s)G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)} i_g^* - \frac{G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)} u_{\text{pcc}} = \quad (3)$$

$$G_{\text{eq}} i_g^* - Y_{\text{eq}} u_{\text{pcc}}$$

其中:

$$G_1(s) = \frac{G_c(s)G_{\text{pwm}}(s)}{s^2 L_1 C_f + s G_{\text{pwm}}(s) k_c C_f + 1} \quad (4)$$

$$G_2(s) = \frac{s^2 L_1 C_f + s G_{\text{pwm}}(s) k_c C_f + 1}{s^3 L_1 L_2 C_f + s^2 G_{\text{pwm}}(s) k_c L_2 C_f + s(L_1 + L_2)} \quad (5)$$

式中:  $G_{\text{eq}}$  为等效电流源系数;  $Y_{\text{eq}}$  为等效输出阻抗。式(3)即为直驱风机传递函数模型, 进而可绘制其诺顿等效电路如图 4 所示。

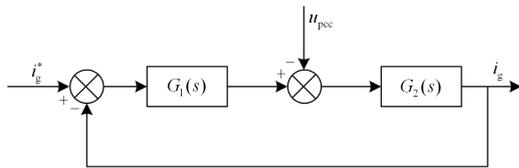


图 3 并网电流简化控制框图

Fig. 3 Simplified control diagram of grid-connected current

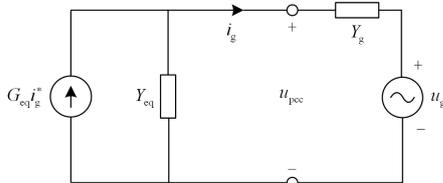


图 4 直驱风机诺顿等效电路图

Fig. 4 Norton equivalent circuit of direct drive wind turbine

## 1.2 直驱风场传递函数矩阵

直驱风场内各机组经 PCC 接入电网, 其拓扑结构如图 5 所示。结合单台直驱风机诺顿等效电路, 可绘制出直驱风场诺顿等效电路如图 6 所示。

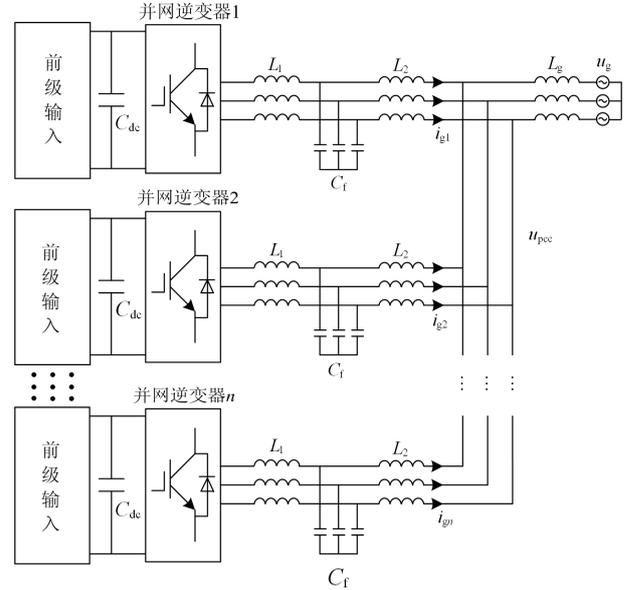


图 5 直驱风机拓扑结构图

Fig. 5 Topology of direct drive wind farm

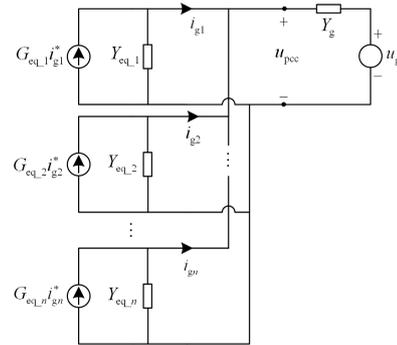


图 6 直驱风场诺顿等效电路图

Fig. 6 Norton equivalent circuit of direct drive wind farm

假设所有风机的主电路参数、控制策略及控制参数都相同, 则有

$$\begin{cases} G_{\text{eq},1} = \dots = G_{\text{eq},n} = G_{\text{eq}} \\ Y_{\text{eq},1} = \dots = Y_{\text{eq},n} = Y_{\text{eq}} \end{cases} \quad (6)$$

由基尔霍夫定律, 可得并网点电压  $u_{\text{pcc}}$  表达式为

$$u_{\text{pcc}} = \frac{G_{\text{eq}} \cdot \sum_{i=1}^n i_{gi}^* + u_g \cdot Y_g}{n \cdot Y_{\text{eq}} + Y_g} \quad (7)$$

以各机组参考电流  $i_{gi}^*$  作为系统控制输入, 电网电压  $u_g$  作为系统扰动输入, 各机组实际并网电流  $i_{gi}$

作为系统输出, 建立三者的关系矩阵为

$$\begin{bmatrix} i_{g1} \\ i_{g2} \\ \vdots \\ i_{gn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1n} \\ G_{21} & G_{22} & \cdots & G_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n1} & G_{n2} & \cdots & G_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{g1}^* \\ i_{g2}^* \\ \vdots \\ i_{gn}^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} u_g = \mathbf{G}(s) \cdot \begin{bmatrix} i_{g1}^* \\ i_{g2}^* \\ \vdots \\ i_{gn}^* \end{bmatrix} - \mathbf{Y}(s) \cdot u_g \quad (8)$$

由于所有机组参数均相同, 则该系统具有对称性。易知每台机组并网参考电流  $i_{gi}^*$  对其自身的输出电流  $i_{gi}$  有着相同的影响, 因此传递函数矩阵  $\mathbf{G}(s)$  的所有对角元素都相等。同理, 每台机组的参考电流  $i_{gi}^*$  对其他机组的并网输出电流  $i_{gj}$  ( $i \neq j$ ) 影响也相同, 因此  $\mathbf{G}(s)$  的所有非对角元素也相等。结合式(3)与式(8), 整理可得  $G_{ii}$  与  $G_{ij}$  的表达式为

$$\begin{cases} G_{ii} = \frac{(n-1) \cdot Y_{eq} + Y_g}{n \cdot Y_{eq} + Y_g} \cdot G_{eq} \\ G_{ij} = -\frac{Y_{eq}}{n \cdot Y_{eq} + Y_g} \cdot G_{eq} \end{cases} \quad (9)$$

若电网阻抗为 0, 即  $Y_g$  为无穷大, 此时传递函数矩阵非对角元素  $G_{ij}$  等于 0, 说明风场接入强电网时机组间不会产生交互作用, 即电网阻抗是机组间产生交互作用的原因。若电网阻抗不为 0, 则  $G_{ij}$  也不为 0, 此时各机组并网电流不仅受自身电流控制回路影响, 还受并联其他机组的电流控制回路影响, 说明直驱风场中各机组之间存在交互作用。

## 2 RGA 原理

### 2.1 RGA 基本原理

相对增益矩阵原理最早由 Bristol 提出<sup>[24]</sup>, 是一种分析多变量控制系统交互作用的有效方法。对于一个多输入多输出闭环控制系统, 其输入  $u_j$  与输出  $y_i$  的相对增益  $\lambda_{ij}$  定义为<sup>[25]</sup>

$$\lambda_{ij} = \frac{\frac{\partial y_i}{\partial u_j} \Big|_{\Delta u_k = 0, k \neq j}}{\frac{\partial y_i}{\partial u_j} \Big|_{\Delta y_k = 0, k \neq i}} \quad (10)$$

由式(10)可知,  $\lambda_{ij}$  描述了其他控制回路对  $y_i - u_j$  控制回路的影响程度。对于  $n$  输入、 $m$  输出的闭环控制系统, 所有的相对增益  $\lambda_{ij}$  构成了一个  $n \times m$  维的 RGA 矩阵, 该矩阵包含了系统不同控制回路间交互作用的定量信息。因此, 通过分析闭环

控制系统的 RGA 矩阵, 即可定量地研究系统控制回路间的交互作用。

RGA 矩阵计算公式为

$$\mathbf{RGA} = \mathbf{G}(j \cdot 2\pi f) \otimes (\mathbf{G}(j \cdot 2\pi f)^{-1})^T \quad (11)$$

式中:  $\otimes$  表示 Hadamard 积;  $f$  表示频率;  $\mathbf{G}(j \cdot 2\pi f)$  为传递函数矩阵  $\mathbf{G}(s)$  的频域值。通过分析不同频率下系统的 RGA 矩阵, 即可获得不同频率下系统控制回路间交互作用的程度。

RGA 矩阵具有以下特性:

1) 其任意一行或一列各元素之和为 1。

2) 若  $\lambda_{ij}$  等于 1, 则其他控制回路对  $y_i - u_j$  控制回路没有耦合影响。 $\lambda_{ij}$  越接近 1, 则其他控制回路对  $y_i - u_j$  控制回路的影响越小。若  $\lambda_{ij}$  大于 1, 说明控制回路之间存在负交互影响, 此时交互影响会降低控制回路原有效果。

### 2.2 基于 RGA 的直驱风场内机组间交互作用分析

将 RGA 原理应用于直驱风场内机组间交互作用分析的步骤如下:

1) 建立直驱风机诺顿等效模型, 结合风场拓扑结构, 得到直驱风场诺顿等效模型。

2) 以各风机并网参考电流为控制输入量, 各风机实际并网电流为输出量, 得到闭环控制系统的传递函数矩阵  $\mathbf{G}(s)$ , 分析各机组电流控制回路间交互作用的产生机理。

3) 由传递函数矩阵  $\mathbf{G}(s)$ , 基于 RGA 原理计算各机组电流控制回路的 RGA 矩阵为

$$\mathbf{RGA} = \begin{bmatrix} \Delta i_{g1}^* & \Delta i_{g2}^* & \cdots & \Delta i_{gn}^* \\ \Delta i_{g1} \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \cdots & \lambda_{1n} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \cdots & \lambda_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{n1} & \lambda_{n2} & \cdots & \lambda_{nn} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$\mathbf{RGA}$  矩阵元素反映了各机组并网输出电流变化量和输入参考电流变化量之间的关系, 从而可定量地分析不同频率及不同参数下各机组控制回路间交互作用的程度。

### 3 基于 RGA 的直驱风场机组间谐波交互分析

假设各风机参数均相同, 易知 RGA 矩阵也具有对称性。因此, 通过分析 RGA 矩阵对角元素  $\lambda_{ii}$  即可定量地确定风场内机组间的交互作用特性。根据已建立的直驱风场传递函数模型, 基于 RGA 原理定量地分析不同频率下 QPR 控制器参数  $k_p$ 、 $k_r$ , 电容电流反馈系数  $k_c$ , 等效电网电感  $L_g$  (为方便起见, 以上四种参数以两台机组进行分析) 及风机台数  $n$  对各机组电流控制回路间交互作用的影响规律。

直驱风机各参数如表 1 所示。本文不涉及参数设计, 具体设计方法可参考文献[26-28]。

表 1 直驱风机参数

Table 1 Parameters of direct drive wind turbine

参数	数值
直流侧电压	1 200 V
电网电压	690 V
电网频率	50 Hz
PWM 开关频率	5 000 Hz
$I_g^*$	141 A
$L_1$	2 mH
$L_2$	0.1 mH
$C_f$	150 $\mu$ F
$L_g$	1 mH
$k_p$	2
$k_r$	150
$k_c$	0.3

### 3.1 交互作用与频率的关系

不同频率下(0~1 200 Hz), RGA 对角元素  $\lambda_{11}$  的幅值如图 7 所示。

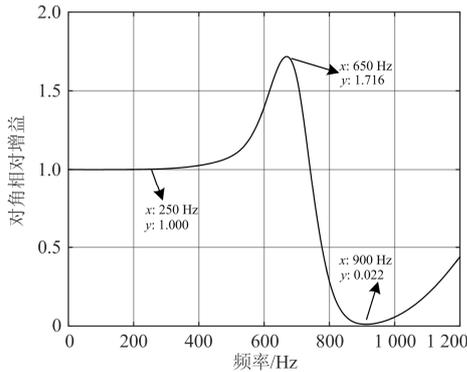


图 7 不同频率下的对角相对增益

Fig. 7 Diagonal relative gain at different frequencies

由图 7 可以看出, 不同频率下机组间交互作用程度不同:

当频率  $f < 250$  Hz 时, 相对增益  $\lambda_{11}$  为 1, 此时机组间基本没有交互作用;

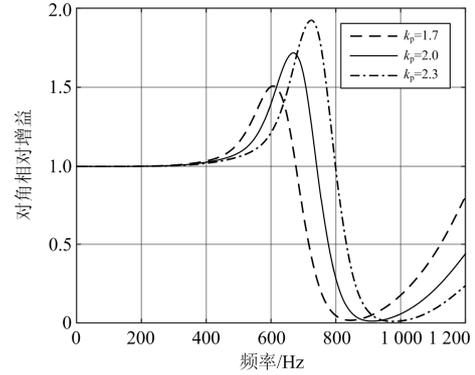
当  $250$  Hz  $< f < 750$  Hz 时, 相对增益  $\lambda_{11}$  大于 1, 控制回路间表现为负交互作用, 使得原有控制回路闭环增益增大, 此时负交互作用会增大该频率谐波;

当  $f > 750$  Hz 时, 相对增益  $\lambda_{11}$  小于 1, 控制回路间表现为正交互作用, 使得原有控制回路闭环增益减小, 有助于抑制该频率谐波, 尤其在 900 Hz 处, 正交互程度最大, 该频率谐波的抑制效果较好。

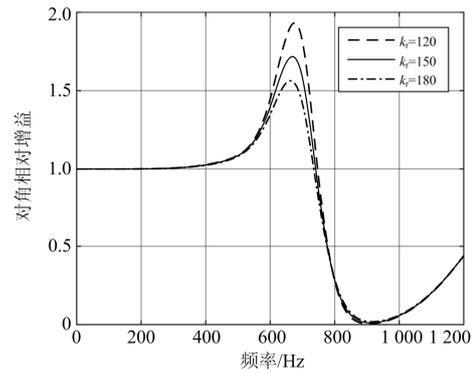
### 3.2 交互作用与系统参数的关系

为研究谐波交互作用特性与系统参数间的关

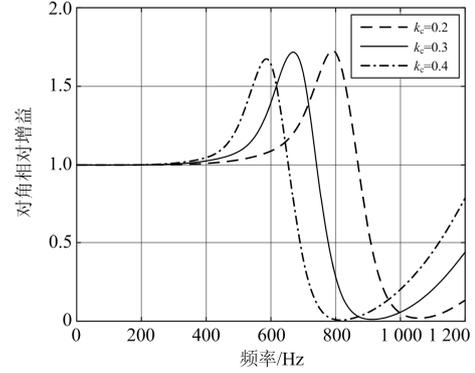
系, 分别改变 QPR 控制器参数  $k_p$ 、 $k_r$ , 电容电流反馈系数  $k_c$ , 电网电感  $L_g$  及并网风机台数  $n$ , 得到相对增益  $\lambda_{11}$  随频率变化的曲线如图 8 所示。



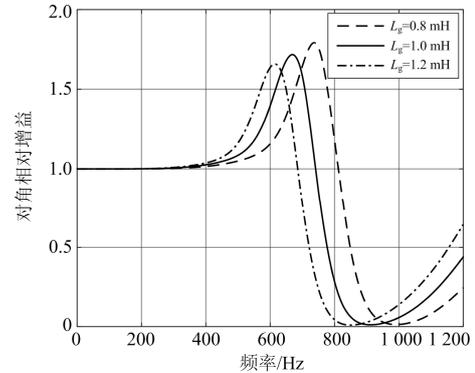
(a)  $k_p$



(b)  $k_r$



(c)  $k_c$



(d)  $L_g$

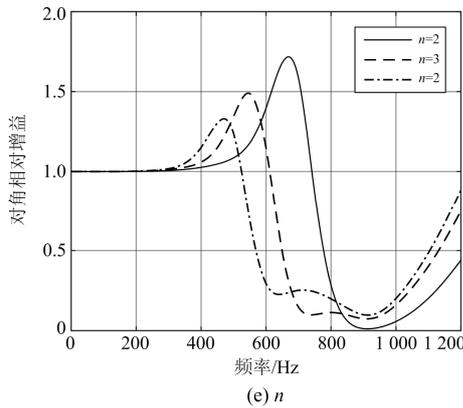


图 8 不同参数下的对角相对增益

Fig. 8 Diagonal relative gain under different parameters

由图 8 可以看出：图 8(a)中，随着  $k_p$  的增大，相对增益  $\lambda_{11}$  呈增大趋势，负交互作用程度增加。图 8(b)中，随着  $k_r$  的增大，交互作用发生频率基本不变，相对增益  $\lambda_{11}$  呈减小趋势，负交互作用程度减小。图 8(c)和图 8(d)中，随着  $k_c$  和  $L_g$  的增大，相对增益曲线向左偏移，交互作用发生频率逐渐靠近低频段，易对系统运行产生不利影响。图 8(e)中，随着并联台数  $n$  的增加，负交互作用峰值大幅减小，机组间负交互作用程度减弱。由此可见，参数变化时机组间的谐波交互作用特性也随之发生变化。因此，在设计实际并网风电场参数时，应综合考虑参数变化对机组间谐波交互作用的影响，将控制谐波交互程度这一指标纳入设计要求之中，以减小机组间的谐波负交互作用程度并使得交互作用频率远离基频。

#### 4 Matlab/Simulink 仿真验证

##### 4.1 不同频率下交互作用特性的验证

为验证图 7 中交互作用特性与频率的关系，在 Matlab/Simulink 软件上搭建直驱风场并网模型，以其中一台机组 WT1 为研究对象，在其输入参考电流中分别加入 5% 的 250 Hz、650 Hz 和 900 Hz 的谐波电流，比较 WT1 单独运行和两台机组并联运行时 WT1 并网输出电流中各谐波电流含量的大小，结果如图 9 所示。

由图 9 可以看出：加入 250 Hz 谐波电流时，WT1 单独运行与两台机组并联运行下该频率谐波含量基本相同，说明 250 Hz 频率下 WT1 基本不受其他机组的影响，即相对增益  $\lambda_{11} = 1$ 。加入 650 Hz 谐波电流时，两台机组并联运行下该频率谐波含量明显增大，说明 650 Hz 频率下 WT1 与其他机组之间存在负交互作用，即相对增益  $\lambda_{11} > 1$ ，此时机组间交互影响对该频率谐波含量有增大作用。当加入

900 Hz 谐波电流时，两台机组并联运行下该频率谐波含量明显减少，说明 900 Hz 频率下 WT1 与其他机组之间存在正交互作用，即相对增益  $\lambda_{11} < 1$ ，此时机组间交互影响对该频率谐波含量有抑制作用。仿真结果与图 7 理论分析具有一致性。

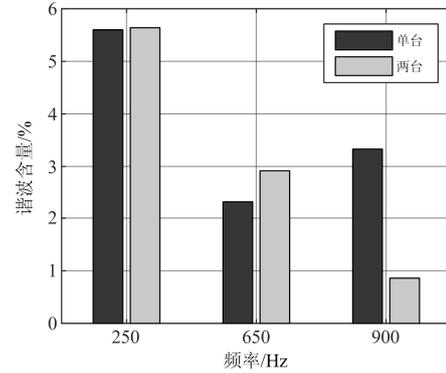


图 9 WT1 各次谐波含量

Fig. 9 Harmonic content of WT1 at different frequencies

##### 4.2 不同参数下谐波交互作用特性的验证

为验证图 8 中谐波交互作用特性与参数的关系，首先选取不同参数下相对增益曲线的特征点频率，使得各参数变化时在特征点频率处的相对增益  $\lambda_{11}$  有较大的区分度，各参数相对增益曲线的特征点频率及对应的相对增益  $\lambda_{11}$  如表 2 所示。

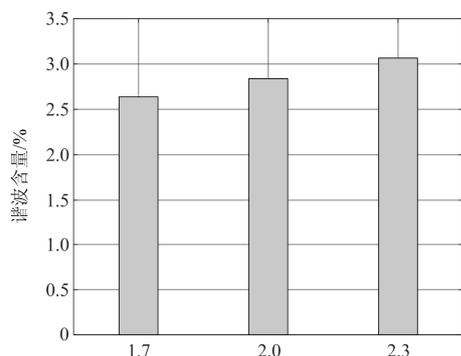
表 2 不同参数的特征点频率及对角相对增益

Table 2 Characteristic frequencies and diagonal relative gain under different parameters

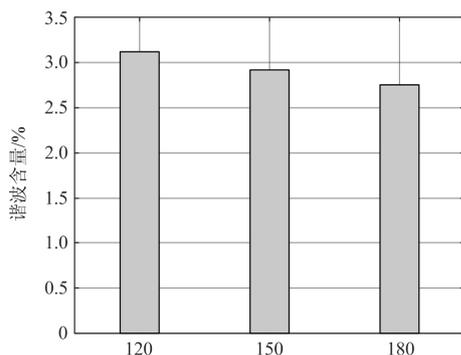
参数	特征点频率/Hz	对角相对增益
		0.399( $k_p=1.7$ )
$k_p$	750	1.000( $k_p=2.0$ )
		1.831( $k_p=2.3$ )
		1.814( $k_r=120$ )
$k_r$	650	1.716( $k_r=150$ )
		1.563( $k_r=180$ )
		1.351( $k_c=0.2$ )
$k_c$	750	1.000( $k_c=0.3$ )
		0.205( $k_c=0.4$ )
		0.416( $L_g=0.8$ mH)
$L_g$	750	1.000( $L_g=1.0$ mH)
		1.774( $L_g=1.2$ mH)
		0.253( $n=2$ )
$n$	600	1.000( $n=3$ )
		1.495( $n=4$ )

在 WT1 的参考电流中分别加入 5% 的特征点频率谐波电流，通过 WT1 并网电流中特征点频率下谐波含量的变化情况对表 2 进行验证，仿真结果如图 10 所示。

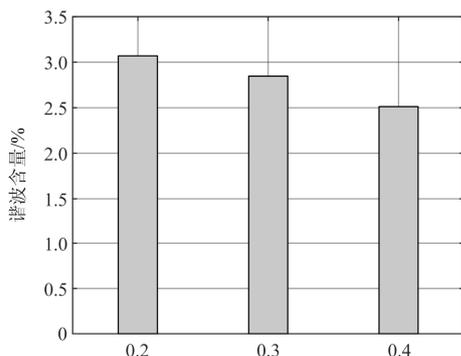
分析图 10 仿真结果。以  $k_p$  为例, 在 750 Hz 特征点频率处, 随着  $k_p$  增大其对应的特征点频率谐波



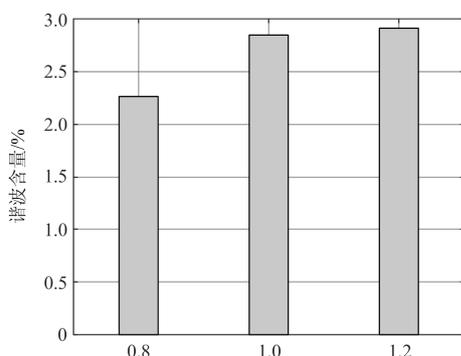
(a)



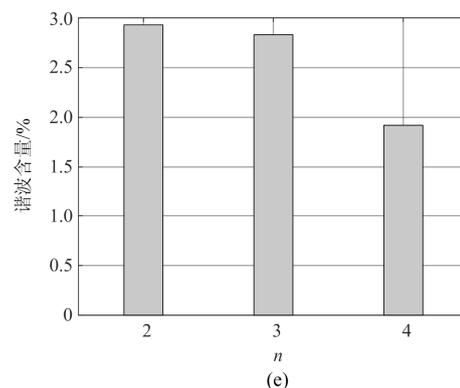
(b)



(c)



(d)



(e)

图 10 不同参数下 WT1 特征点频率谐波含量

Fig. 10 Harmonic content of WT1 at characteristic frequencies under different parameters

含量也增大, 与表 2 中相对增益  $\lambda_{11}$  的变化规律相同。其他的仿真结果同样验证了表 2 中相对增益  $\lambda_{11}$  的变化规律。仿真结果与图 8 理论分析具有一致性。

## 5 基于 StarSim+PXI 硬件在环实验验证

本文基于 StarSim+PXI 硬件在环实时仿真平台进行实验验证。与传统的交流电网系统不一样, 电力电子系统含有快速开合的电力电子器件, 开关频率一般都在 kHz 级别。为了准确地仿真这样的系统, 实时仿真的步长需要是 PWM 周期的 1/50 或 1/100, 即仿真步长需要在数百纳秒和数微秒之间。就目前技术而言, CPU 硬件很难达到这样的小步长, 此时可利用基于 FPGA 的仿真平台来实现微秒级别的电力电子小步长实时仿真。

基于 StarSim+PXI 的硬件在环实时仿真系统架构如图 11 所示。由 StarSim Editor 搭建实验的主电路拓扑(即图 1), 并通过基于配置的模型管理软件 StarSim HIL 进行物理 I/O 接口的配置, 然后下载到基于 FPGA 运算的 PXI 实时仿真机箱上运行。使用 StarSim RCP 配合 MT RCP 硬件平台, 将 LabVIEW 编写的算法模型直接代码生成下载到控制机箱上。PXI 机箱与控制机箱通过实验转接板进行信号传输, 控制机箱采集仿真电路的模拟信号, 并通过算法计算实时返回控制信号, 仿真机箱接受控制信号, 实时仿真出电路响应并输出给控制机箱构成系统闭环。实验转接板除了提供信号传输的回路, 板上配置的 BNC 接头还可外接示波器, 在实验过程中进行真实信号的观测。

将实验平台配置完善, 实验工况与第 4 节仿真工况相同, 对第 4 节仿真结果进行验证。附录为不同工况下 WT1 实际并网电流波形(取单相), 数字示

波器波形图纵坐标每格代表 20 A，横坐标每格代表 10 ms。考虑实验器材精度有限及实验过程中的噪声扰动，实际测试波形与软件仿真不可避免地存在差异性，因此，本文仅通过观测实验波形的畸变程度对谐波交互作用特性进行验证。

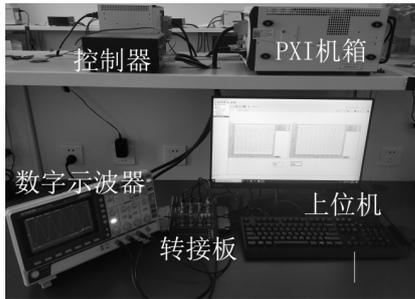


图 11 基于 StarSim+PXI 的硬件在环实时仿真系统

Fig. 11 Hardware-in-the-loop real-time simulation system based on StarSim and PXI

对比附录图 A1 和图 A2 可以发现，单台和两台机组并联运行时，在 250 Hz、650 Hz、900 Hz 下的并网电流的谐波含量变化规律与图 9 仿真结果一致，即验证了交互作用与频率变化的关系。由图 A3、A4、A5、A6、A7 可以看出，不同参数下特征点频率处并网电流谐波含量的实验结果与图 10 仿真结果具有一致性，即验证了交互作用与系统参数的关系。

## 6 结论

本文基于  $\alpha\beta$  坐标系建立了并网直驱风场多输入多输出传递函数模型，基于 RGA 原理，定量地分析了不同控制参数、等效电网电感及并网风机台数下风场内各机组控制回路间的谐波交互作用特性，得到的结论如下。

(1) 直驱风场内各机组间存在谐波交互，且系统参数的变化会影响机组间谐波交互作用特性。在设计实际风电场时，应将谐波交互这一指标纳入设计要求之中，综合考虑机组间的谐波交互特性，以减弱机组间的负谐波交互作用程度，并使得交互作用频率远离工频，改善风场输出的电能质量。

(2) 系统参数改变时，各机组控制回路间谐波交互作用特性也随之改变。具体表现为：QPR 比例系数  $k_p$ 、电容电流反馈系数  $k_c$ 、电网电感  $L_g$  及并网风机台数  $n$  变化时，机组间交互作用频率及程度都会发生变化；而改变 QPR 谐振系数  $k_r$ ，仅对交互作用程度有影响。

本文研究结果为  $\alpha\beta$  坐标系下采用 QPR 控制器时直驱风场内机组间的谐波交互特性分析提供了理论依据及实验验证，同时为优化风场并网电能质量

提供了指导。该研究内容可进一步拓展研究混合风电场内不同种类风机间、风电场与 HVDC 间的谐波交互作用特性。

## 附录

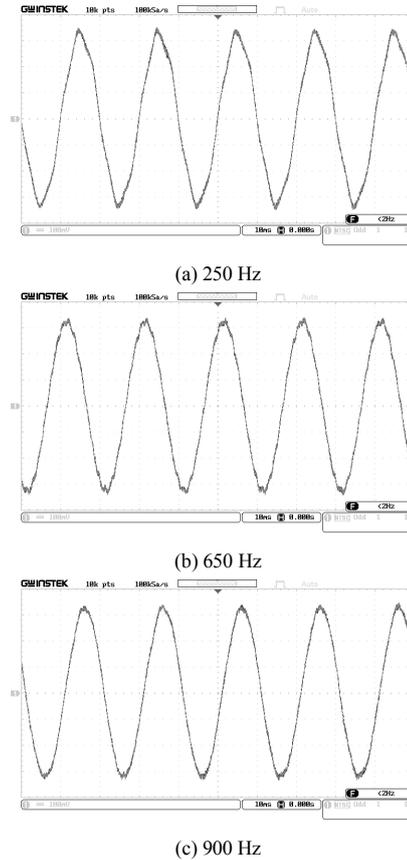
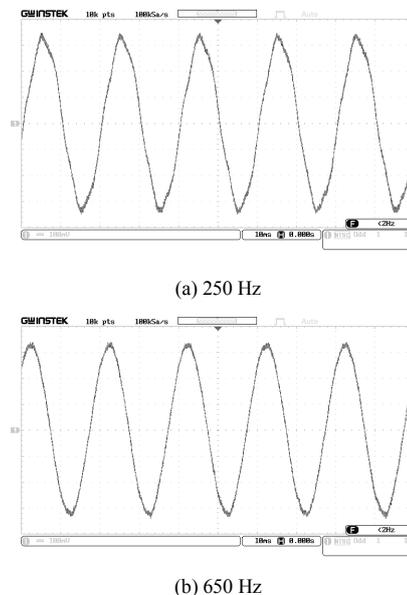
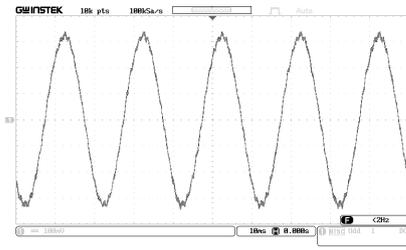


图 A1 两台风机并网时 WT1 并网电流波形

Fig. A1 Grid-connected current of WT1 when two units connected to the grid



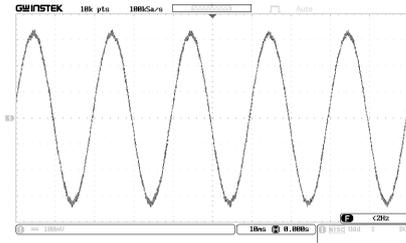
(b) 650 Hz



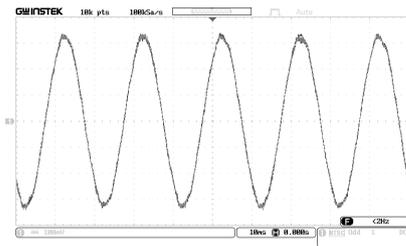
(c) 900 Hz

图 A2 单台风机并网电流波形

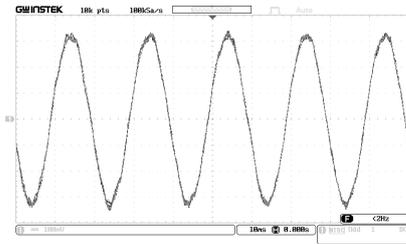
Fig. A2 Grid-connected current when single direct drive wind turbine connected to the grid



(a)  $k_p = 1.7$



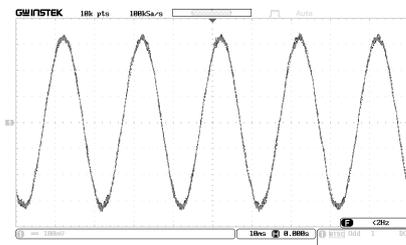
(b)  $k_p = 2.0$



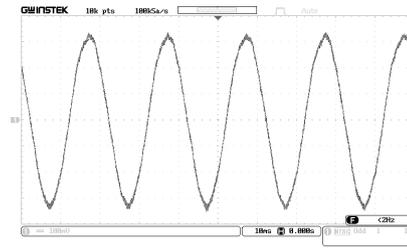
(c)  $k_p = 2.3$

图 A3 不同  $k_p$  下 WT1 并网电流波形

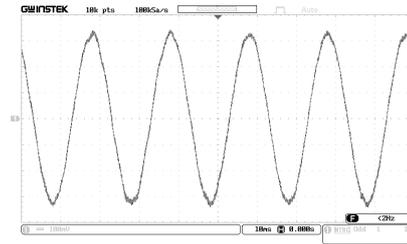
Fig. A3 Grid-connected current of WT1 under different  $k_p$



(a)  $k_r = 120$



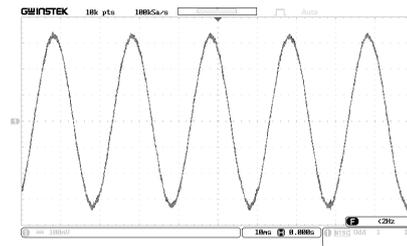
(b)  $k_r = 150$



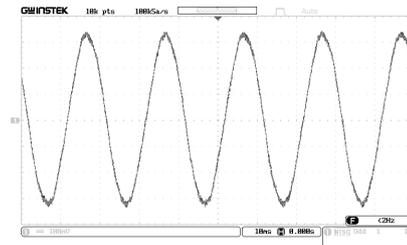
(c)  $k_r = 180$

图 A4 不同  $k_r$  下 WT1 并网电流波形

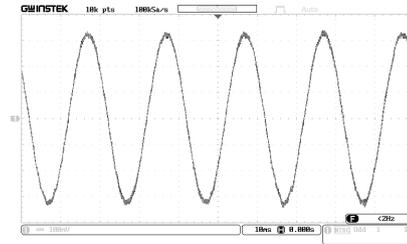
Fig. A4 Grid-connected current of WT1 under different  $k_r$



(a)  $k_c = 0.2$



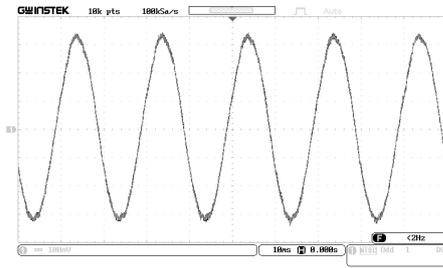
(b)  $k_c = 0.3$



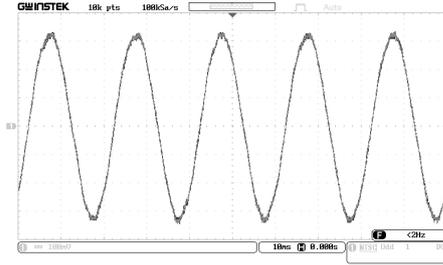
(c)  $k_c = 0.4$

图 A5 不同  $k_c$  下 WT1 并网电流波形

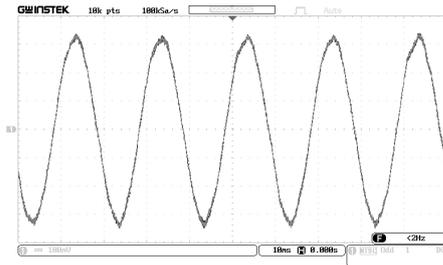
Fig. A5 Grid-connected current of WT1 under different  $k_c$



(a)  $L_g = 0.8$



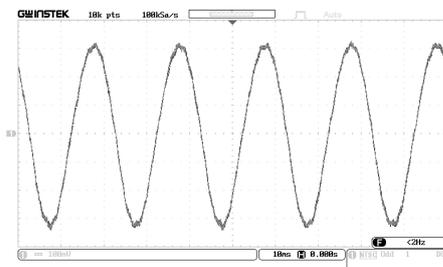
(b)  $L_g = 1.0$



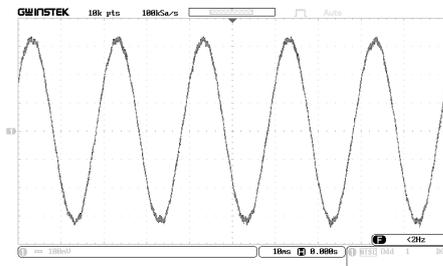
(c)  $L_g = 1.2$

图 A6 不同  $L_g$  下 WT1 并网电流波形

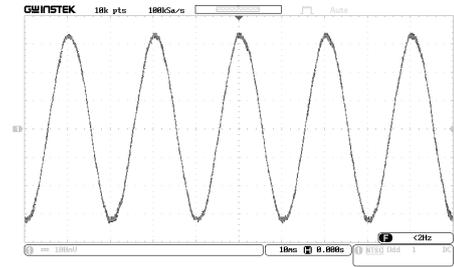
Fig. A6 Grid-connected current of WT1 under different  $L_g$



(a)  $n = 2$



(b)  $n = 3$



(c)  $n = 4$

图 A7 不同  $n$  下 WT1 并网电流波形

Fig. A7 Grid-connected current of WT1 under different  $n$

参考文献

- [1] AVEROUS N R, STIENEKER M, KOCK S, et al. Development of a 4 MW full-size wind-turbine test bench[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(2): 600-609.
- [2] ESCH J. High-power wind energy conversion systems: state-of-the-art and emerging technologies[J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(5): 736-739.
- [3] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.  
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technical characteristics of China's new generation power system in energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.
- [4] TORKI W, GROUZ F, SBITA L. Vector control of a PMSG direct-drive wind turbine[C] // 2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems, March 23-25, 2017, Hammamet, Tunisia: 1-6.
- [5] 庄明振. 海上风电场并网方案研究[J]. 东北电力大学学报, 2016, 36(4): 19-25.  
ZHUANG Mingzhen. Research of integration schemes of offshore windfarm[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2016, 36(4): 19-25.
- [6] 陈宝平, 林涛, 陈汝斯, 等. 采用 VSC-HVDC 并网的直驱风电场次/超同步振荡特性[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 44-59.  
CHEN Baoping, LIN Tao, CHEN Rusi, et al. Analysis on characteristics of sub/super-synchronous oscillation caused by grid-connected direct-drive wind farm via VSC-HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 44-59.
- [7] 高金辉, 刘潇. 一种新型光伏并网逆变器同步控制策略[J]. 河南师范大学学报: 自然科学版, 2014, 42(2): 37-41.

- GAO Jinhui, LIU Xiao. A novel photovoltaic grid-connected inverter synchronization control strategy[J]. Journal of Henan Normal University: Natural Science Edition, 2014, 42(2): 37-41.
- [8] 徐红灿, 滕予非, 王晓茹. 基于重复和准比例谐振复合的直驱风机网侧变流器控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 95-102.
- XU Hongchan, TENG Yufei, WANG Xiaoru. A control strategy combining repetitive control and quasi-PR control for PMSG grid-side converter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 95-102.
- [9] 王丹, 刘崇茹, 李庚银. 直驱型风电并网系统建模及关键参数变化影响研究[J]. 华北电力大学学报: 自然科学版, 2015, 42(6): 78-83, 100.
- WANG Dan, LIU Chongru, LI Gengyin. Research on modelling of direct-drive wind power integration system and influence of key parameters change[J]. Journal of North China Electric Power University: Natural Science Edition, 2015, 42(6): 78-83, 100.
- [10] 王丁会, 刘广林, 杨怀宇. 永磁直驱风力发电机辅助散热段散热分析[J]. 热力发电, 2014, 43(1): 118-121.
- WANG Dinghui, LIU Guanglin, YANG Huaiyu. Thermal analysis on auxiliary cooling sections of a permanent magnet direct-driven wind turbine[J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(1): 118-121.
- [11] 李丹, 刘洪波, 蔡婷婷. 基于柔性直流并网风电场的故障穿越策略述[J]. 东北电力大学学报, 2018, 38(6): 13-20.
- LI Dan, LIU Hongbo, CAI Tingting. Fault ride-through strategies for the connection of large-scale wind farm based VSC-HVDC[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2018, 38(6): 13-20.
- [12] 田武, 许傲然, 田明辉, 等. 大功率直驱风机并网技术的研究[J]. 沈阳工程学院学报: 自然科学版, 2015, 11(1): 63-65, 69.
- TIAN Wu, XU Aoran, TIAN Minghui, et al. Research of the grid technology for high power direct-driven wind turbine[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering: Natural Science, 2015, 11(1): 63-65, 69.
- [13] 王炜, 谭锦文, 颀孙旭, 等. 高渗透率并网风力发电的谐波特点及其抑制研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(9): 59-66.
- WANG Wei, TAN Jinwen, ZHUAN Sunxu, et al. Study on harmonic characteristics and suppression of high-permeability grid-connected wind power generation[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(9): 59-66.
- [14] 李炜, 仇志华, 隋国正, 等. 配电网谐波量测装置最优配置方法[J]. 电力工程技术, 2018, 37(6): 109-114.
- LI Wei, ZHANG Zhihua, SUI Guozheng, et al. The optimal allocation method of harmonic measuring device in distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(6): 109-114.
- [15] HE J W, LI Y W, BOSNJAK D, et al. Investigation and active damping of multiple resonances in a parallel-inverter-based microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1): 234-246.
- [16] 王振浩, 孙玮澳, 孙福军. 光伏系统并网的多逆变器并联交互影响分析[J]. 电力电子技术, 2017, 51(2): 29-32.
- WANG Zhenhao, SUN Wei'ao, SUN Fujun. Interaction analysis of multiple paralleled inverters in photovoltaic system[J]. Power Electronics, 2017, 51(2): 29-32.
- [17] 唐振东, 杨洪耕. 基于奇异值分解法的多逆变器并网控制系统交互影响研究[J]. 现代电力, 2017, 34(3): 82-87.
- TANG Zhendong, YANG Honggeng. Study on the interaction among control systems of multiple grid-connected inverters based on SVD method[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(3): 82-87.
- [18] 唐振东, 杨洪耕, 袁林. 弱电网下多逆变器并网控制通道间的交互影响分析[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3524-3531.
- TANG Zhendong, YANG Honggeng, YUAN Lin. Analysis on interactive influences among control loops of multi inverters connected to weak-structured power system[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3524-3531.
- [19] 龙熹, 陈敏, 彭国荣, 等. 基于比例多谐振控制的直驱永磁风力发电系统谐波抑制研究[J]. 可再生能源, 2016, 34(9): 1314-1319.
- LONG Xi, CHEN Min, PENG Guorong, et al. Research on harmonic suppression of D-PMSG wind power generator system based on proportional-multi resonant controller[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(9): 1314-1319.
- [20] 姜燕. 直驱型永磁同步风力发电系统变流器控制方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- JIANG Yan. Research on control methods of converter for direct-drive permanent magnet synchronous wind power generation system[D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [21] 王亮, 王冰, 黄存荣. 基于多 PR 控制的并网逆变器设

- 计与参数整定[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(7): 45-51.  
WANG Liang, WANG Bing, HUANG Cunrong. Design and parameter tuning of grid-connected inverters based on multi-resonant PR controller[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(7): 45-51.
- [22] 周立, 郑丹花. 采用 LCL 滤波器的三相光伏并网逆变器准 PR 控制[J]. 高压电器, 2017, 53(5): 75-81.  
ZHOU Li, ZHENG Danhua. Quasi PR control of three phase photovoltaic grid-connected inverter with LCL filter[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(5): 75-81.
- [23] LIU T, LIU Z, LIU J, et al. Comprehensive analysis of virtual impedance-based active damping for LCL resonance in grid-connected inverters[C] // 2018 International Power Electronics Conference, May 20-24, 2018, Niigata, Japan: 2681-2687.
- [24] BRISTOL E. On a new measure of interaction for multivariable process control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1966, 11(1): 133-134.
- [25] 江全元, 邹振宇, 吴昊, 等. 基于相对增益矩阵原理的柔性交流输电系统控制器交互影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 23-28, 78.  
JIANG Quanyuan, ZOU Zhenyu, WU Hao, et al. Interaction analysis of FACTS controllers based on RGA Principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 23-28, 78.
- [26] 孟建辉, 石新春, 付超, 等. 基于 PR 控制的光伏并网电流优化控制[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 42-47.  
MENG Jianhui, SHI Xinchun, FU Chao, et al. Optimal control of photovoltaic grid-connected current based on PR control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 42-47.
- [27] 雷亚雄, 李建文, 李永刚. 基于准 PR 调节器电流双闭环 LCL 三相并网逆变器控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 44-50.  
LEI Yaxiong, LI Jianwen, LI Yonggang. Control strategy of three-phase LCL grid-connected inverter based on quasi-PR adjuster[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 44-50.
- [28] 郭利辉, 张元敏, 李永辉, 等. 三相电压型 PWM 变流器交流侧 LCL 滤波器的有源阻尼策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 132-138.  
GUO Lihui, ZHANG Yuanmin, LI Yonghui, et al. Research on active damping strategy of LCL filter in three-phase voltage source PWM rectifier[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 132-138.

收稿日期: 2019-05-23; 修回日期: 2019-07-13

作者简介:

韩平平(1981—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统建模与控制、新能源发电技术; E-mail: lh021211@163.com

汪龙建(1995—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电技术。E-mail: wjlhfut@163.com

(编辑 魏小丽)