

弱电网下多逆变器并网控制通道间的交互影响分析

唐振东, 杨洪耕, 袁林

(四川大学 电气信息学院, 四川省 成都市 610065)

Analysis on Interactive Influences Among Control Loops of Multi Inverters Connected to Weak-Structured Power System

TANG Zhendong, YANG Honggeng, YUAN Lin

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: Long-distance power transmission and increasing number of grid-connected inverters make power network equivalent impedance for grid-connected multi inverters not ignorable in weak-structured power systems. Existence of power network equivalent impedance couples multiple inverters in PCC, and then causes complex interactive influences among control loops of multi inverters. Equivalent model of multi inverters connected to weak-structured power system was established. Dynamic relative gain array based on frequency was used to quantitatively analyze interactive influences among control loops of multi inverters and give interactive change characteristics for changing grid-connected inverter units, control parameters and power grid equivalent impedance. Finally, grid-connected multi inverters model was built in Simulink platform to verify correctness of analytical results. General rules of changing interactive influences among control loops with increasing number of grid-connected inverters were accurately described.

KEY WORDS: weak-structured grid; relative gain array; Nieder-Linski index; interactive control; multi grid-connected inverters

摘要: 弱电网下, 长距离的输电线路和并网逆变器数目的增加使得多逆变器并网时的电网阻抗不可忽略。电网等值阻抗的存在将多个逆变器通过公共连接点(point of common coupling, PCC)耦合起来从而引起逆变器控制通道间产生复杂交互影响。建立弱电网下多逆变器并网等效模型, 采用基于频率的RGA矩阵与NI指数相结合的方法对逆变器控制通道间的交互作用进行定量分析, 在确保并网系统稳定性的前提下, 给出了随着并网逆变器台数、控制参数和电网等值阻抗改变时交互影响的变化特性。最后, 在Simulink仿真平台中搭建多逆变器并网模型, 验证分析结果正确性的同时精确描述了多逆变器并网时随着逆变器并网台数的增加控制交互影响变化的一般规律。

关键词: 弱电网; 相对增益矩阵; NI指数; 控制交互; 多并网逆变器

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2016.11.036

0 引言

近年来, 由于土地、光照等资源的约束, 大规模的新能源站多建在我国西部偏远地区或沙漠/半沙漠地带^[1-2], 长距离的输电线路使得多逆变器并网时电网阻抗不可忽略。而在逆变器设计和分析时, 公共连接点(point of common coupling, PCC)电压通常被认为是恒定的, 不考虑电网阻抗的耦合作用, 逆变器的运行不受其他并联逆变器输出波动的影响^[3-4]。实际上, 由于电网等值阻抗的存在, 多个并联的逆变器通过PCC点耦合在一起交互影响, 使得多逆变器实际并网运行特性并不理想。

目前, 国内外对多LCL型逆变器并网交互影响的研究主要集中在: 1) 逆变器LCL滤波器的设计与控制^[5-6]; 2) 多逆变器并网谐波交互与建模^[7-8]。文献[9]建立并网逆变器的等效输出阻抗模型, 并基于此研究了多并网逆变器与电网的谐波交互作用。现有文献均提出了精确的逆变器并网建模方法, 却极少对多逆变器并网时控制通道之间的交互影响进行分析。文献[10]建立离散化的逆变器并网诺顿模型, 通过闭环传递函数的伯德图判断多机并联时进网电流的谐波分布范围和幅值达到定量分析交互作用的目的。文献[11]定量地分析了多逆变器并网时控制通道间的交互影响大小, 但其分析时仅简单地以2台并网逆变器为例, 难以精确描述多台逆变器并网时交互作用的复杂规律。

相对增益矩阵(relative gain array, RGA)原理最早由Bristol在1966年提出^[12], 是一种分析多变量控制系统交互影响和耦合程度的有效方法。目前, RGA已成功应用在FACTS、HVDC等领域^[13-16], 通过定量的分析装置间的交互影响从而对输入、输出变量进行匹配, 选择合适的控制方案。RGA的最大优势在于计算简便, 但由于RGA忽略了过程的

动态信息，只能分析各变量间的静态耦合作用。2009年，Wuhua Hu, Wenjian Cai 等人提出了多输入、多输出系统基于频率的 RGA 的计算方法。文献[17]通过对一定工作频率范围内基于频率的动态相对增益的求取，对输入量/输出量进行合理配对，将时域和频域相结合得到全面的分析结果。

本文以弱电网接入为研究背景，采用基于频率的 RGA 矩阵与 NI 指数结合的方法分析多逆变器并网控制通道间的交互影响。建立弱电网下多逆变器并网模型并对其运行特性给予分析，基于 RGA 原理对多逆变器并网控制通道间的交互作用定量分析，给出并联逆变器台数、控制参数和等效电网阻抗变化时控制通道交互影响的变化规律。最后在 MATLAB/Simulink 仿真平台中搭建多逆变器并网模型，验证上述分析方法的可行性。

1 基于频率的动态相对增益矩阵

1.1 RGA 原理

多输入、多输出(multi-input multi-put, MIMO)系统中，由于输入量和输出量往往不止一对，各控制通道间可能存在某种程度的耦合作用，进而产生交互影响。其交互影响可定义为^[18]：“在一个多变量控制系统中，某个操作输入量影响一系列测量输出量，或者是某个输出量被很多输入量所影响”。若此交互影响增强了控制效果，则称为正交互作用，否则，称为负交互作用。

如图 1 所示的 MIMO 系统， $G(s)$ 为系统传递函数矩阵，输入量 u_j 与输出量 y_i 间的相对增益值 λ_{ij} 定义为

$$\lambda_{ij} = \frac{\frac{\partial y_i}{\partial u_j} |_{\Delta u_k = 0, k \neq j}}{\frac{\partial y_i}{\partial u_j} |_{\Delta y_k = 0, k \neq i}} \quad (1)$$

式中：分子增益表示在控制通道均开环的情况下，

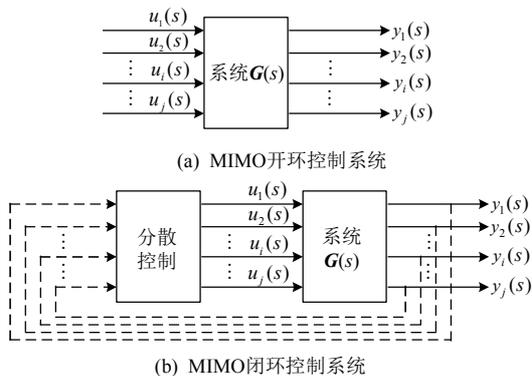


图 1 MIMO 控制系统
Fig. 1 MIMO control system

除 u_j 至 y_i 控制通道，其他控制通道全部断开时所得到的通道增益，如图 1(a)所示；分母增益则表示当其他输出量均不变时， u_j 至 y_i 的控制通道增益，如图 1(b)所示。

MIMO 系统中，所有的相对增益值 λ_{ij} 构成 RGA 矩阵，该矩阵描述了不同控制通道间的交互影响大小，计算方法如下

$$R_{GA}(s) = [\lambda_{ij}] = G(s) \otimes [G(s)^{-1}]^T \quad (2)$$

式中 \otimes 表示矩阵的 Hadamard 乘积。

以双输入双输出系统为例，简述 RGA 矩阵的计算过程。在稳态下有

$$\begin{cases} \Delta y_1 = g_{11}\Delta u_1 + g_{12}\Delta u_2 \\ \Delta y_2 = g_{21}\Delta u_1 + g_{22}\Delta u_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中 g_{ij} 为系统传递函数矩阵 $G(s)$ 的元素。

当 $\Delta y_2 = g_{21}\Delta u_1 + g_{22}\Delta u_2 = 0$ 时，可得

$$\frac{\Delta y_1}{\Delta u_1} \Big|_{\Delta y_2=0} = \frac{g_{11}g_{22} - g_{12}g_{21}}{g_{22}} \quad (4)$$

由 RGA 的定义得，相对增益矩阵元素 λ_{11} 为

$$\lambda_{11} = \frac{g_{11}}{\Delta y_1 / \Delta u_1 |_{\Delta y_2=0}} = \frac{g_{11}g_{22}}{g_{11}g_{22} - g_{12}g_{21}} \quad (5)$$

对于相对增益矩阵 RGA，具有如下特性：

- 1) $\sum_{i=1}^n \lambda_{ij} = 1, \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} = 1 (i, j = 1, 2, \dots, n)$ 。
- 2) 若 $\lambda_{ij} = 0$ ， u_j 将无法控制 y_i ；若 $\lambda_{ij} = 1$ ，则 u_j 至 y_i 控制通道与其它控制通道的交互影响为零，即彼此间不存在耦合作用。
- 3) 若 $\lambda_{ij} \leq 0$ ，则控制系统的不同控制通道间的交互影响很大，该系统将失去稳定；若 $0.8 \leq \lambda_{ij} \leq 1.2$ ，则交互影响较小，且 λ_{ij} 越接近于 1，交互影响越小；若 $0.3 \leq \lambda_{ij} \leq 0.7$ 或 $\lambda_{ij} \geq 1.5$ ，则表示控制系统交互影响较大，控制通道受耦合作用影响最严重。

1.2 NI 指数

为了兼顾系统闭环性能，确保控制系统稳定性，本文引入 NI(Niederlinski index)指数。NI 指数最早是由 Niederlinski 在 1971 年提出，并被广泛应用为分析多输入、多输出过程配对时的附加准则。对于一个 $n \times n$ 系统来说，若已进行主对角线形式的配对，则有 $y_1-u_1, y_2-u_2, \dots, y_n-u_n$ ；若不是主对角线形式，则需对应调整输入输出的顺序，并使之具有上述形式^[19-20]。NI 指数可定义如下

$$N_1 = \frac{\det[G(s)]}{\det[\bar{G}(s)]} = \frac{\det[G(s)]}{\prod_{i=1}^n g_{ii}} \quad (6)$$

其中分子为 $G(s)$ 的行列式，分母为 $G(s)$ 主对角线上各对应元素的乘积。在所有控制回路均闭合的

情况下, 可证明 NI 值的正负与控制系统的稳定性有密切的关联。因此, NI 指数作为一项准确判断分散控制系统稳定性的依据, 是基于 RGA 原理分析回路配对以及控制通道交互影响时的有利补充。

一般来说, RGA 结合 NI 指数的策略是控制方案匹配选择时的有效指导工具, 其指导准则如下:

1) 匹配后的 RGA 元素应大于 0, 并尽量地接近于 1。

2) $N_i > 0$ 。

3) 尽量避免出现较大的 RGA 元素。

N_i 指数是一种可衡量交互影响程度的全局交互测量指标^[21], 其值越接近于 1, 表示交互影响越小; 根据其符号正负可用来判断系统的稳定性和完整性, 当且仅当 $N_i < 0$ 时, 系统是不稳定的。

将 R_{GA} 矩阵与 N_i 指数相结合, 既能判断单个控制通道与其他控制通道的交互影响强弱, 又能对控制系统的稳定、完整性做出合理评价。

1.3 基于频率的相对增益矩阵

分析矩阵 $G(s)$ 的频率特性, 可令 $s=j\omega=2\pi f$, 则针对每一个系统频率 ω , 对应的相对增益矩阵为

$$R_{GA}(\omega) = \bar{G}(j\omega) \otimes [\bar{G}(j\omega)^{-1}]^T \quad (7)$$

$R_{GA}(\omega)$ 表示不同频率下的系统各控制通道间的相对增益大小。其实, 频域分析下的 $R_{GA}(\omega)$ 物理意义更加明确, 分析不同频率下的相对增益矩阵, 根据一定频率范围内的动态相对增益值的变化趋势易找出发生最严重交互影响的系统频率, 从而便于定量描述弱电网接入下多逆变器并网时控制通道间的交互作用。

1.4 交互影响分析步骤

采用基于频率的 RGA 矩阵与 NI 指数相结合的方法分析控制通道间交互影响的步骤可归纳如下:

1) 建立弱电网下多 LCL 型逆变器并网模型, 并分析逆变器控制通道间交互影响的产生机理。

2) 以各逆变器并网参考电流为控制输入量, 以逆变器实际并网电流为输出量, 从而得到多逆变器并网控制系统的传递函数矩阵 $G(s)$ 。

3) 依据式(6)和式(7)分别计算并网控制系统的 RGA 矩阵和 NI 指数, 据此分析不同系统频率下控制通道间交互影响的强弱以及系统的稳定性。

2 多逆变器并网系统

2.1 弱电网下多逆变器并网结构

为降低并网电流的谐波畸变率, 含 LCL 型滤波装置的逆变器被广泛应用。多逆变器并联接入电网运行结构如图 2 所示^[22]。其中: i_{gn} 为逆变器并网电

流; L_{inv} 、 L_g 和 C_f 分别为 LCL 滤波器逆变器侧电感、电网侧电感和滤波电容。

以逆变器输出侧电压 U_n 为输入量, 并网电流 i_{gn} 为输出量, 两者的关系矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} i_{g1} \\ i_{g2} \\ \vdots \\ i_{gn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1n} \\ G_{21} & G_{22} & \cdots & G_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n1} & G_{n2} & \cdots & G_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: 对角线元素 G_{ii} 表示只考虑逆变器自身作用时, 逆变器输出电压与并网电流之间的传递函数; 非对角元素 $G_{ij}(i \neq j)$ 为考虑逆变器 j 作用时, 其输出电压与逆变器 i 并网电流间的耦合传递函数。假设同批安装的多个 LCL 型逆变器的参数均相同, 则该并网系统具有对称性, $G(s)$ 中各对角线元素相等, 以 G_{11} 表示; 非对角线元素也全部相等, 以 G_{12} 表示。

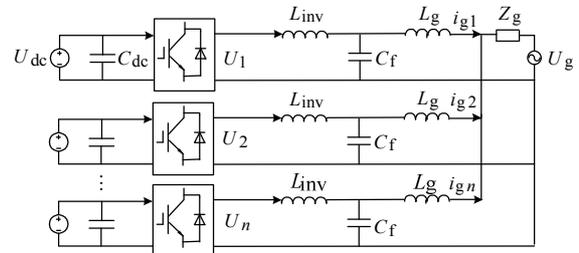


图 2 多逆变器并网结构图

Fig. 2 Block diagram of grid-connected multi-inverters

若以理想电网来考虑, 即电网等值阻抗 Z_g 近似为 0, 则 PCC 电压恒等于 U_g , 多逆变器间不存在耦合作用。但实际上, 目前大规模的新能源电站多建在偏远山区或半沙漠地带, 长距离的输电线路使得并网时电网阻抗不可忽略。同时, 若多个逆变器连接到同一电网 PCC, 任意单个逆变器在 PCC 点所对应的电网等效阻抗会随逆变器数量的增加而增加。这时, 多个并联的 LCL 型逆变器将通过 PCC 电压耦合在一起, 彼此间存在复杂的交互影响。由式(8)知, 弱电网下 G_{11} 和 G_{12} 分别为

$$G_{11} = \frac{i_{g1}}{U_1} \Big|_{U_i=0, i \neq 1} = \frac{n-1}{n} \frac{1}{s^3 L_{inv} L_g C_f + s L_g + s L_{inv}} + \frac{1}{n} \frac{1}{s^3 L_{inv} L_g C_f + s(L_g + L_{inv}) + n Z_g (s^2 L_{inv} C_f + 1)} = \frac{n-1}{n} G_{LCL} + \frac{1}{n} G_{grid} \quad (9)$$

$$G_{12} = \frac{i_{g1}}{U_2} \Big|_{U_i=0, i \neq 2} = -\frac{1}{n} \frac{1}{s^3 L_{inv} L_g C_f + s L_g + s L_{inv}} + \frac{1}{n} \frac{1}{s^3 L_{inv} L_g C_f + s(L_g + L_{inv}) + n Z_g (s^2 L_{inv} C_f + 1)} = -\frac{1}{n} G_{LCL} + \frac{1}{n} G_{grid} \quad (10)$$

式中: $G_{LCL} = 1/(s^3 L_{inv} L_g C_f + s L_g + s L_{inv})$, 表示滤波器内

部传递特性，由表达式知 G_{LCL} 只与 LCL 自身参数有关； $G_{grid}=1/[s^3L_{inv}L_gC_f+s(L_g+L_{inv})+nZ_g(s^2L_{inv}C_f+1)]$ ，表示电网阻抗耦合作用下的逆变器间外部耦合传递特性，与电网阻抗和并联数目 n 有关。

2.2 多逆变器并网控制系统

多逆变器并网控制系统如图 3 所示。其中： i_{refn} 为逆变器并网参考电流值； u_n 为逆变器输出侧电压值。下面以 P_1 内环电流控制系统为例，即采用逆变器并网电流反馈单环控制。由于 P_{WM} 装置采用数字控制时，需要一段时间进行 A/D 转换和计算，从而造成采样时刻和占空比更新时间存在延迟现象，通常将其用一阶惯性环节 $k_{pwm}/(1+1.5sT_s)$ 来表示。其中， T_s 为采样周期， k_{pwm} 为逆变器增益系数。且有 $k_{pwm}=U_{dc}/U_m$ ，其中 U_m 为 PWM 调制波峰值。

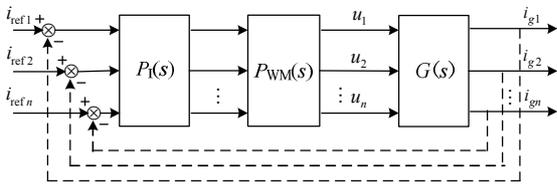


图 3 多逆变器并网控制系统图

Fig. 3 Control block diagram of grid-connected multi-inverters

其中 $P_1(s)$ 为并网电流内环调节器的传递函数，采用比例积分控制，其表达式为 $P_1(s)=k_p+k_i/s$ 。由图 3 知， $P_1(s)$ 和 $P_{WM}(s)$ 皆为对角矩阵，表示如下

$$\begin{cases} P_1(s) = \text{diag}(k_p + k_i / s) \\ P_{WM}(s) = \text{diag}[k_{pwm} / (1 + 1.5sT_s)] \end{cases} \quad (11)$$

弱电网接入下，假设多逆变器并网时的控制系统传递函数矩阵为 $H(s)$ ，有 $I_g(s)=H(s)I_{ref}(s)$ 。令 $s=j\omega=j2\pi f$ ，可计算任意系统频率下 $H(s)$ 的相对增益矩阵 H_{RGA} 。 $H(s)$ 和 H_{RGA} 分别表示为

$$\begin{cases} H(s) = \frac{P_1(s)P_{WM}(s)G(s)}{1 + P_1(s)P_{WM}(s)G(s)} \\ H_{RGA} = \bar{H}(j\omega) \otimes (\bar{H}(j\omega)^{-1})^T \end{cases} \quad (12)$$

H_{RGA} 中元素 $\lambda_{ij}(i, j=1, 2, \dots, n)$ 反映了逆变器并网电流值和各逆变器电流参考量之间的关系。据此易找出发生交互作用的系统频率，从而为研究控制通道间的交互影响提供定量信息。

3 基于频率的 RGA 与 NI 指数分析控制通道交互影响

基于已建立的多逆变器并网系统模型，采用结合频率 RGA 矩阵与 NI 指数的方法分析多逆变器并网时控制通道间的交互影响。逆变器并网参数如表 1 所示，弱电网下，电网的短路比小于 3，依据

短路比与电网等效阻抗的关系，可令电网等效阻抗 $L_{grid}=0.03$ mH。并网逆变器台数以 4 台为例，不同频率下相对增益矩阵对角元素 λ_{11} 的值如图 4 所示。

表 1 逆变器并网参数	
Tab. 1 Parameters of grid-connected inverter	
参数类别	参数说明
逆变器额定功率	500 kW
逆变器开关频率	4500 Hz
电网电压、频率	220 V、50 Hz
PI 控制器参数	$k_p=0.397, k_i=131$
LCL 滤波器参数	$L_{inv}=0.108$ mH, $L_g=0.117$ mH, $C_f=33.4$ μ F

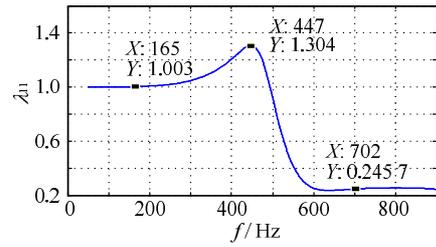


图 4 不同频率下的 λ_{11} 值

Fig. 4 Amplitude of λ_{11} under different frequency

由图 4 知，在 $f < 250$ Hz 频率段，相对增益矩阵元素 λ_{11} 很接近于 1，即此时多并网逆变器控制通道之间基本没有交互作用，随着频率的增大， $\lambda_{11} > 1$ ，控制通道间出现负交互影响，且交互作用逐渐增大， $f=447$ Hz 时，相对增益值达到最大 $\lambda_{11}=1.304$ ，此阶段负交互影响将会使得原有控制通道闭环增益增大，控制通道间有方向相反的控制影响，从而降低控制通道原有效果。当 $f > 600$ Hz 时，控制通道间出现正交互作用，原有逆变器控制通道的闭环增益减少，工程应用中，这种情况有助于抑制相应频次的系统谐波，优化并网电能质量。

考虑多逆变器并网系统的稳定性，由式(12)可得并网系统闭环传递函数 $H(s)$ ，且有 $H(s)$ 的对角线元素和非对角线元素可分别表示为

$$\begin{cases} H_{11} = \frac{K \{ [G_{11}^2 - (n-1)G_{12}^2]K + G_{11} [1 + (n-2)G_{12}K] \}}{[1 + (G_{11} - G_{12})K] \cdot \{ 1 + [G_{11} + (n-1)G_{12}]K \}} \\ H_{12} = \frac{G_{12}K}{[1 + (G_{11} - G_{12})K] \cdot \{ 1 + [G_{11} + (n-1)G_{12}]K \}} \\ K = (k_p + k_i / s) \cdot k_{pwm} / (1 + 1.5sT_s) \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)可知， H_{11} 与 H_{12} 虽然是高阶传递函数，但其分母项是相同的，这是因为当输入信号的作用被忽略时，控制系统的稳定性由闭环极点位置唯一性地确定。由文献[23-24]知， H_{11} 和 H_{12} 的分母项可拆分为两部分予以分析，即方程 $1+(G_{11}-G_{12})K=0$ 的根和方程 $1+[G_{11}+(n-1)G_{12}]K=0$ 的根。

研究两方程根特性可知，该系统极点特性可通

过式(14)所表示的假定闭环系统 S_1 、 S_2 的极点来阐述, 即通过分析假定闭环系统 S_1 、 S_2 的极点分布情况来判断原并网系统稳定性。

$$\begin{cases} S_1 = \frac{(G_{11} - G_{12})K}{1 + (G_{11} - G_{12})K} \\ S_2 = \frac{[G_{11} + (n-1)G_{12}]K}{1 + (G_{11} + (n-1)G_{12})K} \end{cases} \quad (14)$$

工程实际中, 为抑制谐波谐振, LCL 型滤波器滤波电容侧串联有滤波电阻 R 。当滤波电阻 $R=1 \Omega$ 和 2Ω 时, S_1 的闭环系统根轨迹分布图如图 5(a)所示。此时, S_1 的闭环极点全部位于 s 平面的左半部, 且随着 R 的增大, 一对共轭闭环极点越靠近虚轴。图 5(b)为假定闭环系统 S_2 的根轨迹分布图, 随着并网逆变器台数 n 增加, 闭环极点向右偏移, 但仍位于 s 平面的左半部, 并网系统能够稳定运行。

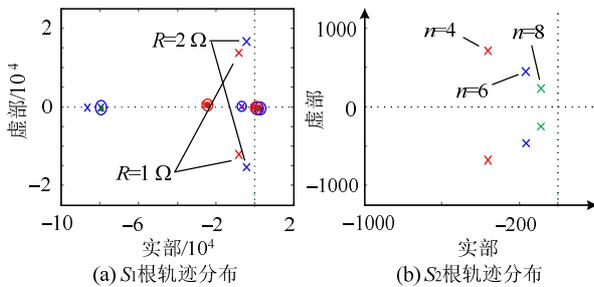


图 5 并网系统根轨迹图

Fig. 5 Root locus diagram of grid-connected system

同时, 通过式(6)可计算图 4 所标注的 3 个关键坐标下的 N_1 指数, 分别为 $N_1=0.997$ 、 0.732 和 1.413 。可见控制通道间交互作用越弱, N_1 指数越接近于 1。同时, 3 个关键坐标下均有 $N_1 > 0$, 可知控制通道间虽然存在着交互作用, 但并网系统仍然是保持稳定的。

分别改变并网逆变器台数 n , 控制参数 k_i 和 k_p 以及弱电网等效电抗 L_{grid} 时, 不同频率下的相对增益矩阵元素 λ_{11} 值如图 6 所示。由图 6(a)可看出, 随着并网台数的增加, 逆变器控制通道间的交互影响逐渐减弱, 且负交互作用最严重的系统频率也逐渐降低。图 6(b)显示, PI 控制器参数 k_p 的增大使得曲线朝频率增大的方向移动, 且峰值逐渐减小, 负交互作用最严重的频率呈逐渐变大的趋势。但在高频段曲线较平稳, k_p 的变化所引起的影响较小。图 6(c)显示, PI 控制器参数 k_i 的改变对并网系统控制通道间的交互影响很微弱, 可忽略不计。由图 6(d)可知, 弱电网下, 等效电网电抗 L_{grid} 的增大使控制通道间的交互影响逐渐增强。基于以上分析, 在满足逆变器并网性能前提下, 参数 k_p 、 k_i 应尽可能设计得较

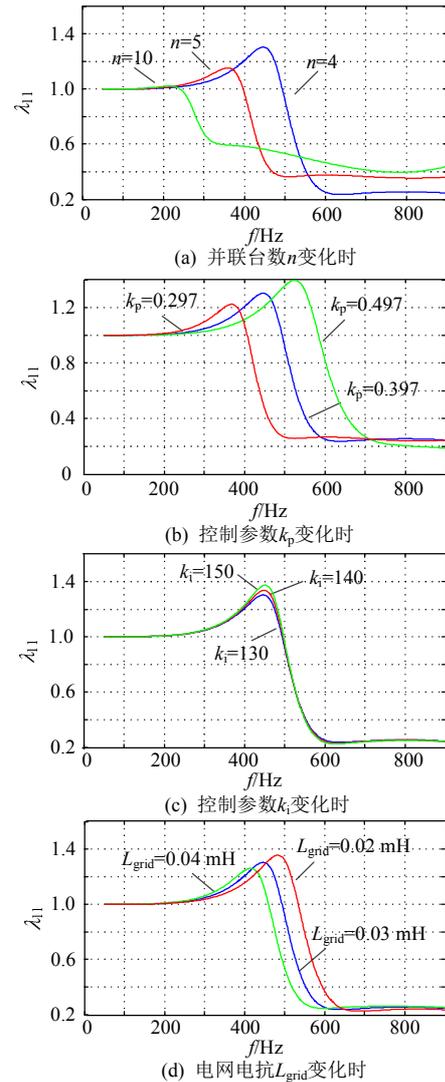


图 6 参数改变时的 λ_{11} 值

Fig. 6 Amplitude of λ_{11} with the changing parameters

小, 以减弱控制通道间的交互影响。

4 仿真分析

为验证本文所采用方法分析弱电网下多逆变器并网时控制通道交互作用的可行性, 在 MATLAB/Simulink 中搭建多逆变器并网模型。并网参数均采用表 1, 为了减短文章篇幅, 仅以仿真数据验证当逆变器台数 n 改变时, 控制通道间交互影响分析所得结论的正确性。

在逆变器 a 的参考电流中分别注入谐波含量为 5% 的 150 Hz、250 Hz、350 Hz、450 Hz、550 Hz 和 850 Hz 的谐波电流。逆变器并网台数增加时, 逆变器 a 并网电流中各频次谐波含量如图 7 所示, 子图中按从左至右的顺序依次为仅有逆变器 a 并网、并网台数为 4 台以及并网台数为 5 台时的情况。

图 7(a)和图 7(b)显示当 f 为 150 Hz 和 250 Hz 时, 并网逆变器台数的增加并不会对逆变器 a 并网

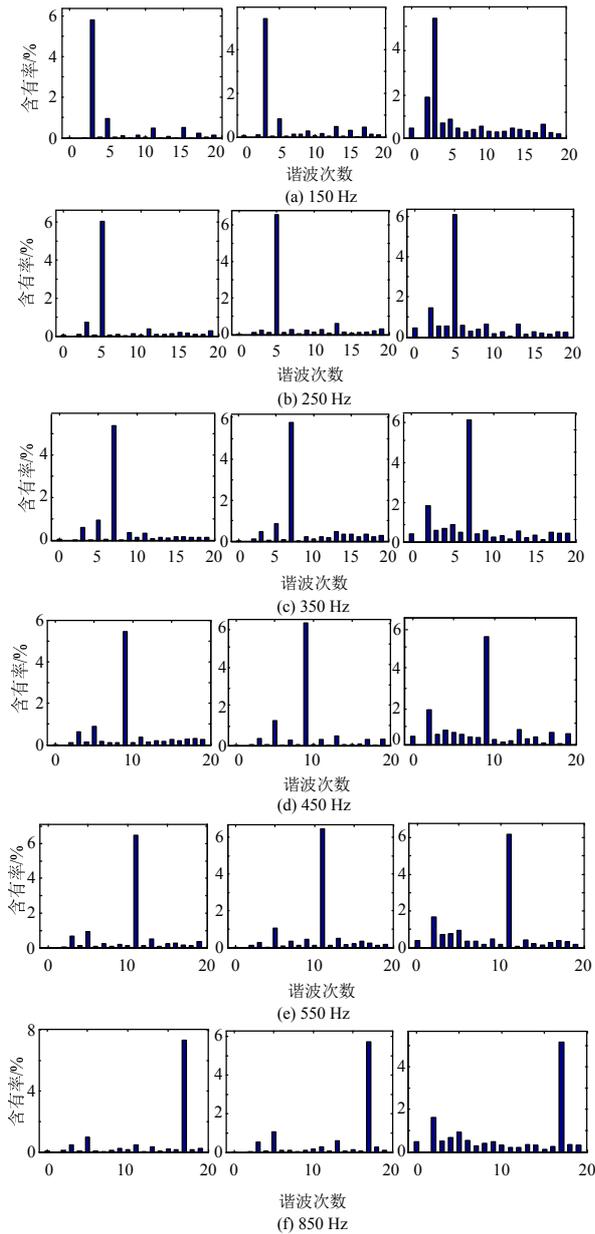


图7 并网台数改变时各频次谐波含有率

Fig. 7 Harmonic ratio of each frequency under different numbers of grid-connected inverters

电流中此频次的谐波含量造成很大影响;由图 7(c)、图 7(d)和图 7(e)知,在系统频率分别为 $f=350\text{ Hz}$ 、 450 Hz 和 550 Hz 下,当并网台数分别为 5 台、4 台和 3 台时,多逆变器控制通道间负交互影响为最大化,逆变器 a 并网电流中对应频次谐波含量明显增大;图 7(f)显示随着并网台数 n 逐渐增至 5 台, $f=850\text{ Hz}$ 频次的并网电流谐波含量不断降低,究其原因在于在此频段,逆变器并网控制通道间存在着正交互作用,相应频次的谐波被有效抑制。以上仿真结果与图 6(a)所得结论一致,证明采用 RGA 原理分析多逆变器并网控制通道间交互影响的正确性。

进一步分析并网台数的改变对弱电网下多逆变器控制通道交互影响的规律,当并网台数分别为

1、2、3、4、5、6 和 10 台时,逆变器 a 并网电流中各频次谐波含量如表 2 所示。其中各频次电流谐波含量的变化趋势如图 8 所示。为判断并网台数为 10 台时的系统稳定性,计算各频次谐波下的 NI 指数,分别为 $N_1=0.998\ 3$ 、 $1.117\ 2$ 、 $1.233\ 8$ 、 $1.272\ 4$ 、 $1.336\ 5$ 和 $1.398\ 1$ 。可见,随着系统频率的增大,NI 指数逐渐远离 1,但均为正值,即此时并网系统保持稳定。

表2 并网电流谐波含量

Tab. 2 Harmonic ratio of the grid-connected current

数量	频率/Hz					
	150	250	350	450	550	850
1	5.6	6.04	5.48	5.47	6.48	7.31
2	5.5	6.05	5.53	5.46	6.62	6.93
3	5.58	6.15	5.52	5.86	7.18	6.26
4	5.52	6.20	5.88	6.16	6.31	5.72
5	5.56	6.13	6.19	5.35	6.11	5.36
6	5.53	6.14	5.47	5.27	5.74	5.12
10	5.51	5.73	5.41	5.16	5.51	5.11

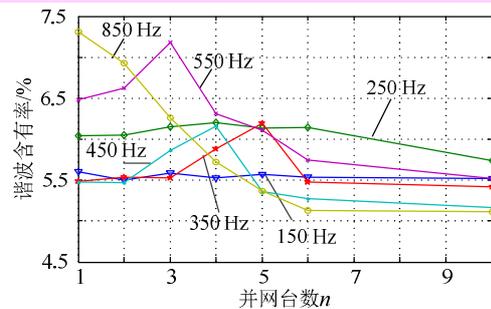


图8 并网电流谐波含量变化趋势

Fig. 8 Changing trend of the grid-connected current harmonic ratio

对表 2 和图 8 进行分析,可得结论如下:

1) 在 150 Hz 和 250 Hz 等低频段,随着逆变器并网台数 n 的增加,控制通道间的交互影响基本不改变逆变器 a 并网电流中此频段的谐波含量。

2) 对于逆变器 a 并网电流中 $f=350\text{ Hz}$ 、 450 Hz 和 550 Hz 等频次谐波来说,因控制通道间的负交互影响使得原有控制通道控制性能减弱,逆变器 a 并网电流中该频次谐波含有率增大。且负交互影响最严重的谐波频率随着并网台数的减小而增大。

3) 对于 850 Hz 以及更高频次的谐波电流来说,控制通道间的正交互作用使逆变器 a 并网电流中该频次谐波含有率不断减小。工程实际中,可借助于上述结论制定相应抑制谐波电流的策略。

5 结论

本文以弱电网接入为研究背景,采用基于频率的 RGA 与 NI 指数结合的方法分析多逆变器并网时控制通道间的交互影响,建立多逆变器并网控制系

统模型并对其弱电网下运行特性给予分析, 研究了随着并网台数、控制参数和电网等效阻抗的改变控制通道交互影响的变化规律。得出结论如下:

a) 弱电网接入下, 电网等值阻抗不可忽略, 多逆变器并网时会通过 PCC 点耦合而引起逆变器控制通道间的交互作用, 进而影响逆变器并网电流中各频次谐波含量。

b) 基于频率的相对增益矩阵 RGA 可定量地分析多逆变器并网时控制通道交互作用的大小, 低频段交互影响会随着并网台数、控制参数和电网等值阻抗的改变呈现强烈的负交互影响, 而高频段交互影响多为正交互影响, 一般有助于抑制相应频次谐波。NI 指数的引入可在分析交互影响的同时对并网系统的稳定性进行判断。

该研究思路可进一步延伸拓展, 本文在分析弱电网下多逆变器并网控制通道间的交互影响时, 主要以低次谐波为例, 而多逆变器耦合的难点在于非整数次谐波的谐振问题, 现有仿真结果尚缺乏对相关问题的分析验证。

参考文献

- [1] Blaabjerg F, Teodorescu R, Liserre M, et al. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2006, 53(5): 1398-1409.
- [2] 严干贵, 常青云, 黄亚峰, 等. 弱电网接入下多光伏逆变器并联运行特性分析[J]. *电网技术*, 2014, 38(4): 933-940.
Yan Gangui, Chang Qingyun, Huang Yafeng, et al. Analysis on parallel operational characteristics of multi photovoltaic inverters connected to weak-structured power system[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(4): 933-940(in Chinese).
- [3] 胡国珍, 段善旭, 陈昌松, 等. 弱电网下储能电池能量回馈系统自适应并网控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(1): 84-89.
Hu Guozhen, Duan Shanxu, Chen Changsong, et al. An adaptive grid-connected control strategy for energy feedback system in weak grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(1): 84-89(in Chinese).
- [4] 严干贵, 李龙, 黄亚峰, 等. 弱电网下联网光伏逆变系统稳定性分析及控制参数整定[J]. *太阳能学报*, 2013, 34(11): 1853-1859.
Yan Gangui, Li Long, Huang Yafeng, et al. Stability analysis and control parameters tuning of grid-connected photovoltaic inverter system in weak grid[J]. *Acta Energies Solaris Sinica*, 2013, 34(11): 1853-1859(in Chinese).
- [5] 杨东升, 阮新波, 吴恒. 提高 LCL 型并网逆变器对弱电网适应能力的虚拟阻抗方法[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 33(15): 2327-2335.
Yang Dongsheng, Ruan Xinbo, Wu Heng. A virtual impedance method to improve the performance of LCL-type grid-connected inverters under weak grid conditions[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 33(15): 2327-2335(in Chinese).
- [6] 刘斌, 王蒙蒙, 黄凯伦, 等. 引入网侧电感电流修正量的 LCL 逆变控制器及其状态估计[J]. *电网技术*, 2016, 40(2): 556-562.
Liu Bin, Wang Mengmeng, Huang Kailun, et al. LCL inverter controller with grid-side inductor current correction and its state estimation [J]. *Power System Technology*, 2016, 40(2): 556-562(in Chinese).
- [7] 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.
- [8] 杨苓, 罗安, 陈燕东, 等. LCL 型逆变器的鲁棒延时补偿并网控制方法及其稳定性分析[J]. *电网技术*, 2015, 39(11): 3102-3108.
Yang Ling, Luo An, Chen Yandong, et al. A robust time delay compensated grid-connected control method for LCL-type inverter and stability analysis [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(11): 3102-3108(in Chinese).
- [9] 许德志, 汪飞, 毛华龙, 等. 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.
Xu Dezhi, Wang Fei, Mao Hualong, et al. Modeling and analysis of harmonic interaction between multiple grid-connected inverters and the utility grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(12): 64-71(in Chinese).
- [10] He J. Investigation and active damping of multiple resonance in a parallel-inverter-based microgrid[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(1): 234-246.
- [11] 胡伟, 孙建军, 马谦, 等. 多个并网逆变器间的交互影响分析[J]. *电网技术*, 2014, 38(9): 2511-2518.
Hu Wei, Sun Jianjun, Ma Qian, et al. Analysis on interactive influence among multi grid-connected inverters[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(9): 2511-2518(in Chinese).
- [12] Bristol E. On a new measure of interaction for multivariable process control[J]. *IEEE Transactions on Automation Control*, 1966, 11(1): 133-134.
- [13] 张鹏翔, 曹一家, 王海风, 等. 相对增益矩阵方法在柔性交流输电系统多变量控制器交互影响分析中的应用[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(7): 13-17.
Zhang Pengxiang, Cao Yijia, Wang Haifeng, et al. Application of relative gain array method to analyze interaction of multi-functional facts controllers[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(7): 13-17(in Chinese).
- [14] 李鹏, 杨世旺, 殷梓恒. 基于相对增益矩阵的微网稳压解耦下垂控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(5): 1041-1050.
Li Peng, Yang Shiwang, Yin Ziheng. Voltage stabilization and decoupling droop control method for microgrid based on RGA[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(5): 1041-1050(in Chinese).
- [15] 贾东强, 韦统振, 霍群海. DSTATCOM 交直流控制回路交互影响分析[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(S2): 324-330.
Jia Dongqiang, Wei Tongzhen, Huo Qunhai. The interaction analysis between AC and DC control loop of DSTATCOM[J]. *Transactions of China Electro Technical Society*, 2013, 28(S2): 324-330(in Chinese).
- [16] 李海琛, 董萍, 刘明波, 等. 基于相对增益矩阵和 Prony 技术的南方电网 FACTS 和 HVDC 之间交互影响分析[J]. *电网技术*, 2012, 36(8): 169-174.
Li Haichen, Dong Ping, Liu Mingbo, et al. Analysis on interaction between FACTS devices and HVDC power transmission system in China southern power grid based on relative gain array and Prony technology [J]. *Power System Technology*, 2012, 36(8): 169-174(in Chinese).
- [17] 周小林, 王志燊, 王永骥, 等. 飞行控制系统的动态相对增益方法研究[J]. *计算技术与自动化*, 2012, 31(4): 7-11.
Zhou Xiaolin, Wang Zhishen, Wang Yongji, et al. Dynamic relative gain array method of flight control system[J]. *Computing Technology and Automation*, 2012, 31(4): 7-11 (in Chinese).
- [18] 曹一家, 陶佳, 王光增, 等. FACTS 控制器间交互影响及协调控制研究进展[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2008, 20(1): 1-8.
Cao Yijia, Tao Jia, Wang Guangzeng, et al. Research progress on

- interaction and coordinated control among FACTS controller[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and its Automation, 2008, 20(1): 1-8(in Chinese).
- [19] 许锋, 魏小丽, 任丽红, 等. 基于多变量广义预测控制的不稳定系统控制结构选择方法[J]. 自动化学报, 2013, 39(9): 1547-1551.
Xu Feng, Wei Xiaoli, Ren Lihong, et al. A control structure selection method based on multivariable generalized predictive control for unstable processes[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(9): 1547-1551(in Chinese).
- [20] 叶凌霄, 宋执环. 多变量控制系统的一种变量配对方法[J]. 控制与决策, 2009, 24(12): 1795-1800.
Ye Lingjian, Song Zhihuan. Variable pairing method for multivariable control systems[J]. Control and Decision, 2009, 24(12): 1795-1800(in Chinese).
- [21] 陈继开, 王振浩, 姚艳菊. 配电系统中 DFACTS 设备运行交互影响研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(9): 50-56.
Chen Jikai, Wang Zhenhao, Yao Yanju. Study on interactions of DFACTS devices operating in distribution system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(9): 50-56(in Chinese).
- [22] 艾欣, 韩晓男, 孙英云. 大型光伏电站并网特性及其低碳运行与控制技术[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 15-23.
Ai Xin, Han Xiaonan, Sun Yingyun. Grid-connected characteristics of large-scale photovoltaic power station and its low-carbon operation and control technology[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 15-23(in Chinese).
- [23] 周德佳, 赵争鸣, 袁立强, 等. 300 kW 光伏并网系统优化控制与稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2008, 23(11): 116-122.
Zhou Dejia, Zhao Zhengming, Yuan Liqiang, et al. Optimum control and stability analysis for a 300 kW photovoltaic grid-connected system[J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2008, 23(11): 116-122 (in Chinese).
- [24] 沈瑶, 罗安, 陈燕东, 等. 基于功率前馈的光伏并网控制方法及稳定性分析[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2449-2453.
Shen Yao, Luo An, Chen Yandong, et al. A power feedforward-based control approach for grid-connection of photovoltaic generation and its stability analysis[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2449-2453(in Chinese).



唐振东

收稿日期: 2015-12-23。

作者简介:

唐振东(1993), 男, 硕士研究生, 研究方向为逆变器并网控制技术与电能质量研究, E-mail: tzdinscu@126.com;

杨洪耕(1949), 男, 教授, 博士生导师, 从事电能质量、无功电压控制、智能电网等方面的教学和科研工作。

袁林(1992), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量的分析与评估研究。

(责任编辑 王晔)