

# 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

唐振东, 杨洪耕

(四川大学电气信息学院, 四川成都 610065)

## Study on the Interaction Among Control Systems of Multiple Grid-connected Inverters Based on the SVD Method

TANG Zhendong, YANG Honggeng

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

**摘要:** 针对弱电网下多逆变器并网时控制系统间出现的交互影响现象, 本文提出基于奇异值分解法进行研究。建立弱电网下多逆变器并网等效模型, 采用基于奇异值分解法(SVD)对逆变器控制系统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角 $\theta$ 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。同时, 精确描述了随着并网台数的增加, 多逆变器并网控制系统间交互影响对并网电流中某些频次谐波含有率改变的一般规律。

**关键词:** 奇异值分解法; 并网逆变器; 交互影响; 弱电网

**Abstract:** As to the interacting influences among control systems caused by multiple inverters connected to weak power grid, which is studied by using the SVD method. The equivalent model of weak-structured power system with multiple grid-connected inverters is established, SVD is used to quantitatively analyze the interaction influences among control systems of multiple inverters, and varying characteristics of interaction influence angle  $\theta$  varying with the number of grid-connected inverters, control parameters and equivalent impedance of power grid is given with the premise of ensuring the stability of power system. In the end, the power grid model with multiple grid-connected inverters is built on Simulink simulation platform to verify the correctness of analysis results. At the same time, general rules that the interaction influences among control systems for multiple grid-connected inverters on the containing rate for certain harmonics are accurately described.

**Keywords:** SVD; grid-connected inverters; interaction; weak power grid

## 0 引言

随着能源危机和环境污染的日益严重, 以风力和太阳能为主的分布式发电系统愈发受到关注与研究<sup>[1-3]</sup>。而并网逆变器是分布式发电系统的重要组成部分。相比于 L 型和 LC 型并网逆变器, LCL 型并网逆变器因对高频谐波电流具有较大的衰减作用从而被广泛地使用<sup>[4-5]</sup>。

由于土地、风力和光照等资源的约束, 大规模的新能源站多建立于偏远地区以及沙漠/半沙漠地带, 长距离的输电线路使得多逆变器并网时电网等效阻抗不可忽略<sup>[6-7]</sup>, 这时, 多个并联的逆变器通过 PCC 点耦合在一起, 从而引起多逆变器并网控制系统间的复杂交互影响。

现有研究文献极少对逆变器并网控制系统交互影响进行建模分析。文献 [8] 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 [9] 定量地分析了多逆变器并网控制系统间的交互影响影响强弱, 但其分析时仅简单以两台并网逆变器为例, 难以准确描述多逆变器并网控制系统间的交互影响规律。

奇异值分解法(singular value decomposition, SVD)最早被广泛应用于线性动态系统的辨识、最佳逼近和试验数据处理等问题的有效工具, 现已受到电力研究人员的重视, 并被成功应用在 FACTS 控制器间的交互影响分析研究领域<sup>[10-12]</sup>。文献 [12-13] 针对多台 FACTS 装置控制器可能存在的交互影响问题, 采用 SVD 方法进行分析并研究

电气参数对交互作用的影响规律。

本文采用 SVD 方法分析多逆变器并网控制系统间的交互影响强弱。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 SVD 方法对多逆变器并网控制系统间的交互影响进行定量分析，并以交互角为综合指标分析随着逆变器并网台数、控制参数以及电网强度改变时的控制系统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，验证上述方法的可行性。

## 1 奇异值分解法原理及应用

### 1.1 奇异值分解法原理

奇异值分解(SVD)是一种矩阵分解和变换技术，通过一系列的线性变换，把矩阵旋转到一个新的坐标下。矩阵 A 的奇异值可定义如下：

设  $A \in C_r^{m \times n}$ ，矩阵  $A^H A$  的特征值为  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_r > 0$  ( $r$  为矩阵 A 的秩)，且有  $\lambda_{r+1} = \lambda_{r+2} = \dots = 0$ ，同时，称  $\sigma_i = \sqrt{\lambda_i}$  ( $i = 1, 2, \dots, r, \dots, n$ ) 为矩阵 A 的奇异值。

矩阵的奇异值分解过程如下：对于  $A \in C_r^{m \times n}$ ，存在酉矩阵  $Z \in C_r^{m \times m}$ ， $V \in C_r^{n \times n}$ ，使得

$$A = Z \begin{pmatrix} \Delta & 0 \\ 0 & \Delta \end{pmatrix} V^T \quad (1)$$

式中： $\Delta = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r)$ ， $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r > 0$  为矩阵 A 的奇异值。 $Z = [z_1, z_2, \dots, z_r, \dots, z_m]$ 、 $V = [v_1, v_2, \dots, v_r, \dots, v_n]$  分别为矩阵 A 的左、右奇异向量，且分别构成酉空间的标准正交基底。

### 1.2 奇异值分解法在控制系统中的应用

对于一个多输入多输出系统，其传递函数矩阵  $G(s)$  可分解为

$$G(s) = Z(s) \Lambda(s) V(s)^T \quad (2)$$

由于  $Z(s)$  和  $V(s)$  分别构成酉空间的标准正交基底，则  $G(s)$  可表示为

$$G(s) = \sum_{i=1}^m \sigma_i(s) z_i(s) v_i(s)^T = \sum_{i=1}^m \sigma_i(s) W_i(s) \quad (3)$$

控制系统中，有  $Y(s) = G(s)U(s)$ ，将式(2)代入其中，则有

$$Y(s) = Z(s) \Lambda(s) V(s)^T U(s) \quad (4)$$

基于上述分析知，控制系统第  $k$  个输出量对于第  $l$  个输入量的增益可表示为

$$g_{kl}(s) = \frac{y_k(s)}{u_l(s)} = \sum_{i=1}^m \sigma_i \langle W_i(s), E_{kl} \rangle \quad (5)$$

式中： $\langle W_i(s), E_{kl} \rangle \equiv ((e_k)^T z_i(s))(v_l^T(s) e_l)$ ，其中， $e_k$  和  $e_l$  均为单位向量。

由式(5)可知，奇异值  $\sigma_i$  影响控制环节 ( $k, l$ ) 的相关因素为  $\langle W_i(s), E_{kl} \rangle$ ，且  $|\langle W_i(s), E_{kl} \rangle| \leq 1$ 。不妨定义如下

$$\theta_i = \arccos |\langle W_i(s), E_{kl} \rangle| \quad (6)$$

当  $|\langle W_i(s), E_{kl} \rangle| \cong 1$  时， $\theta_i \cong 0$ ，则控制环节 ( $k, l$ ) 增益最大化，不存在交互影响。也就是说， $\theta_i$  在研究系统频率范围内越小越好，说明此时交互影响最小。而对于不同的矩阵奇异值，可定义交互角  $\theta$  来评价系统整体交互影响的大小，即

$$\theta = \arccos \left[ \frac{\sum_{i=1}^m \sigma_i^2 \cos^2 \theta_i}{\sum_{i=1}^m \sigma_i^2} \right]^{1/2} \quad (7)$$

当  $\theta=0$  即  $\cos \theta=1$  时，不存在交互影响；当  $\theta=\pi/2$  即  $\cos \theta=0$  时，表示向量正交，交互影响最大。

## 2 多逆变器并网传递函数

### 2.1 多逆变器并网结构

为降低并网电流的谐波畸变率，LCL 型逆变器被广泛应用于可再生能源发电系统中。多逆变器并网运行结构图如图 1 所示。其中， $i_{gn}$  为逆变器并网电流， $L_{inv}$ 、 $L_g$  和  $C_f$  分别为 LCL 型滤波器逆变器侧电感、电网侧电感和滤波电容。

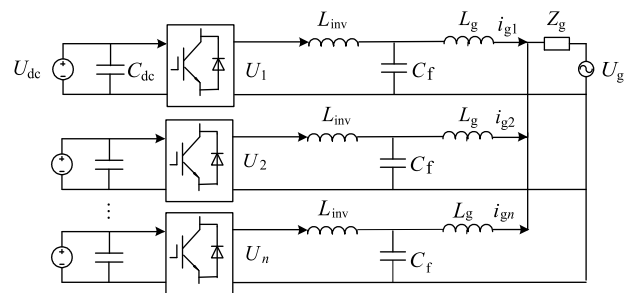


图 1 多逆变器并网结构图

以逆变器输出侧电压  $U_n$  为系统输入量，并网电流  $i_{gn}$  为系统输出量，两者之间的关系矩阵为

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

式中：对角线元素  $G_{ii}$  表示仅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。

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。此时，多并联 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

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

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

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； $G_{grid} = 1/(s^3 L_{inv} L_g C_f + s(L_g + L_{inv}) + n Z_g (s^2 L_{inv} C_f + 1))$ ，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量  $n$  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 2 所示。其中， $i_{refn}$  为逆变器并网电流参考值， $u_n$  为逆变器输出侧

电压值。控制系统以 PI 内环电流控制为例，即采用逆变器并网电流反馈单环控制。当 PWM 装置采用数字控制时，A/D 转换和计算需要一定的时间，从而易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，有  $k_{pwm} = U_{dc}/U_m$ ， $U_m$  为 PWM 调制波峰值。

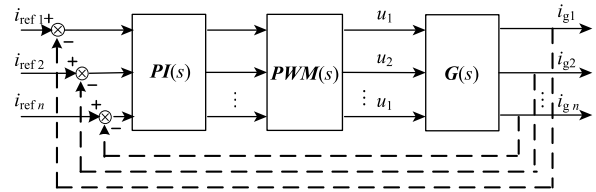


图 2 多逆变器并网控制系统图

其中， $PI(s)$  为并网电流内环调节器的传递函数，通常采用比例积分控制，表达式为  $PI(s) = k_p + k_i/s$ 。由图 2 知， $PI(s)$  和  $PWM(s)$  皆为对角矩阵，表示如下

$$\begin{cases} PI(s) = \text{diag}(k_p + k_i/s) \\ PWM(s) = \text{diag}(k_{pwm}/(1+1.5sT_s)) \end{cases} \quad (11)$$

弱电网下，假设多逆变器并网时的控制系统传递函数矩阵为  $H(s)$ ，有  $I_g(s) = H(s)I_{ref}(s)$ 。 $H(s)$  可表示为

$$H(s) = \frac{PI(s)PWM(s)G(s)}{1+PI(s)PWM(s)G(s)} \quad (12)$$

令  $s = j\omega = j2\pi f$ ，可计算任意控制频率下控制系统动态传递函数矩阵  $H(j\omega)$ 。

## 3 分析步骤

采用基于频率的 SVD 方法分析多逆变器并网控制系统交互影响的步骤可归纳如下：

①针对需要研究的多逆变器并网系统，建立弱电网下多 LCL 型逆变器并网模型，并分析逆变器控制系统间交互影响的产生机理。

②以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控制输出量，得到多逆变器并网控制系统的传递函数矩阵  $G(s)$  和  $G(j\omega)$ 。

③依据式(2)将系统传递函数进行奇异值分解，并求取奇异值以及左、右奇异矩阵  $Z(s)$  和  $V(s)$ 。

④通过式(7)计算多逆变器并网控制系统交互影响指标值，即交互角  $\theta$  值。

### 4 基于 SVD 方法的多逆变器控制系统交互影响分析

基于已建立的多逆变器并网控制系统模型，采用基于频率的 SVD 方法分析多逆变器并网时控制系统间的交互影响，并研究交互影响与控制参数和电网强度之间的关系。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，不妨令电网等效阻抗  $L_{grid} = 0.02\text{mH}$ 。逆变器台数以 5 台为例，不同频率下控制系统交互角  $\theta$  值如图 3 所示。

表 1 逆变器并网参数

参数类别	参数值
逆变器额定功率/kW	500
逆变器开关频率/Hz	4 500
电网电压、频率	220V、50Hz
PI 控制器	$k_p=0.397, k_i=131$
LCL 滤波器	$L_{inv}=0.108\text{mH}, L_g=0.117\text{mH}, C_f=33.4 \mu\text{F}$

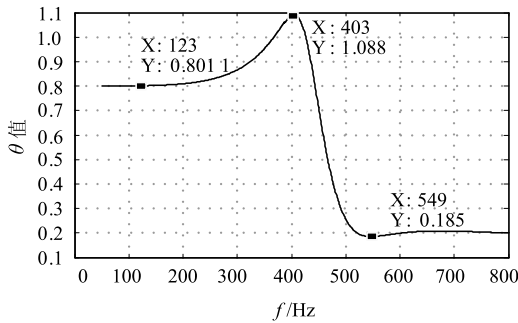


图 3 不同频率下的  $\theta$  值

由图 3 知，不同系统频率下并网控制系统交互角  $\theta$  值有很大差异。当系统频率  $f$  存在  $123\text{Hz} < f < 403\text{Hz}$  时，交互角  $\theta$  不断增大；而当  $403\text{Hz} < f < 549\text{Hz}$  时，交互角  $\theta$  则不断减小。由式(7)可知，交互角  $\theta$  可用来评价控制系统整体交互影响的强弱，当  $\theta=0$  即  $\cos \theta=1$  时，不存在交互影响；当  $\theta=\pi/2$  即  $\cos \theta=0$  时，表示向量正交，交互影响最强。由此可知， $123\text{Hz} < f < 403\text{Hz}$  时，控制系统交互影响逐渐增强，则对应此频段的并网电流谐波含量不断增加； $403\text{Hz} < f < 549\text{Hz}$  时，控制系统交互影响逐渐减弱，对应此频段的并网电流谐波含量也将不断减小。

多逆变器并网控制系统交互影响和逆变器控制参数、电网强度以及并网台数密切相关。在保证并网系统稳定性的前提下，图 4(a)~4(d)分别给出了不同控制参数( $k_p$ 、 $k_i$ )、电网强度  $L_{grid}$  以及并网台数  $n$  下的交互角  $\theta$  与频率  $f$  的关系。

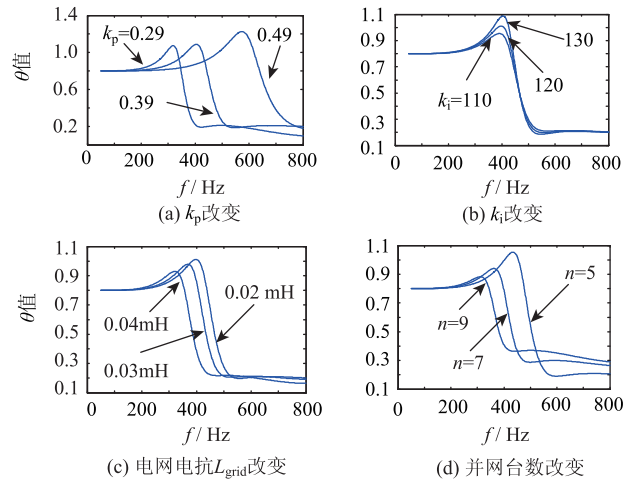


图 4 参数改变时的  $\theta$  值

图 4(a)显示，随着控制参数  $k_p$  的增加，引起并网控制系统交互影响的最大和最小的频率点在横坐标上均向左偏移；图 4(b)显示，随着控制参数  $k_i$  的增大，曲线峰值上移，即在峰值点并网控制系统交互影响逐渐增加。由图 4(c)可知，随着电网等效电抗  $L_{grid}$  的增加，曲线向左移动，即引起并网系统交互影响的最大和最小的频率点逐渐增加；由图 4(d)可知，随着并网逆变器台数的增加，引起并网系统交互影响最大和最小的频率点逐渐变小。且并网台数的改变可能使得同一系统频率下的交互影响出现波动性变化，进而使对应频次的并网电流谐波含量出现波动性增加或减小。

综上所述可知，外界参数(控制器参数、电网强度、并网台数等)的变化可能会改变某一频率下并网控制系统间交互影响程度的强弱，进而引起对应频段的并网电流谐波含量的波动性改变。工程实际中，可有效利用多逆变器并网控制系统间的交互影响变化规律，抑制某一频率下的系统谐波，从而优化并网电能质量。

### 5 仿真分析

为验证本文所采用 SVD 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 中搭建多逆变器并入弱电网模型。并网参数均采用表 1, 为控制文章篇幅, 仅以仿真数据验证随着逆变器并网台数  $n$  改变时, 控制系统间交互影响分析所得结论的实用性。

向逆变器 A 的参考电流中分别注入谐波含量为 5% 的 150Hz、250Hz、350Hz、450Hz、650Hz 和 850Hz 的谐波电流。随着逆变器并网台数  $n$  的增加, 逆变器 A 并网电流中各频次谐波含量如表 2 所示。

表 2 逆变器 A 并网电流谐波含量

并网台数	谐波频率/Hz					
	150	250	350	450	650	850
1	5.51	5.82	5.68	5.47	6.48	7.01
2	5.52	5.89	5.78	5.49	6.45	6.93
3	5.54	6.05	5.98	5.69	6.51	6.98
4	5.62	6.12	6.28	5.85	6.49	7.03
5	5.70	6.25	6.49	5.94	6.52	6.96
6	5.78	6.29	6.59	6.21	6.47	6.99
7	5.81	6.31	6.62	6.53	6.50	7.02
8	5.85	6.39	6.31	6.62	6.52	6.89
9	5.91	6.42	6.10	6.34	6.45	6.95
10	5.96	6.48	5.58	6.14	6.51	6.94

由表 2 可知, 当并网台数固定时, 不同频率下的并网电流谐波含量出现很大差异。而随着并网逆变器台数的增加, 同一频段下的并网电流谐波含量则有可能呈现波动性改变规律。深入分析并网逆变器台数  $n$  的改变对多逆变器并网控制系统交互影响的规律, 将表 2 所示数据绘制成如图 5 所示逆变器 A 并网电流谐波含量变化趋势图。由表 2 和图 5 可得结论如下:

① 在 150Hz 和 250Hz 等并网系统低频段, 随着逆变器并网台数  $n$  的增加, 交互角  $\theta$  始终保持在 1

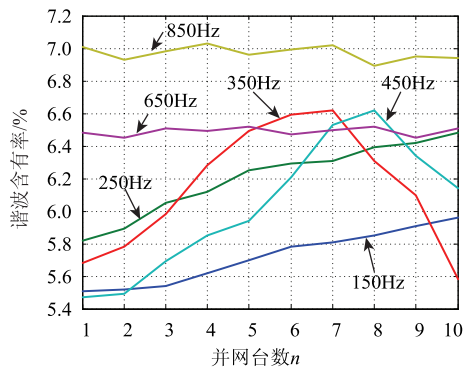


图 5 并网电流谐波含量变化趋势图

附近, 控制系统间的交互影响一直较强, 从而使得逆变器 A 并网电流中对应此频段的谐波含量不断地增加。

② 对于逆变器 A 并网电流中  $f = 350\text{Hz}$ 、 $450\text{Hz}$  等频次谐波来说, 随着逆变器并网台数  $n$  的增加, 控制系统间交互角  $\theta$  先增大后减小, 逆变器 A 并网电流中该频次谐波含有率也呈现先增加后减少的改变趋势。同时在此频段, 随着频率的增加, 交互影响峰值对应的并网台数  $n_{\max}$  呈逐渐增大的趋势(图 5 中,  $f = 350\text{Hz}$  时, 对应并网台数  $n_{\max} = 7$ ;  $f = 450\text{Hz}$  时, 对应并网台数  $n_{\max} = 8$ )。

③ 对于 650Hz、850Hz 以及更高频次的谐波电流来说, 交互角  $\theta$  始终保持在 0.2 附近, 此时, 控制系统间的交互影响很微弱, 基本不会影响该频次下的并网电流谐波含有率大小。

对于含有率逐渐降低的并网谐波频次, 究其原因在于在此频段, 逆变器并网控制系统间的交互影响使得相应频次的谐波被有效抑制。以上仿真结果与图 4(d) 所得结论一致, 证明采用 SVD 方法分析多逆变器并网控制系统间交互影响的正确性和可行性。工程实际中, 可借助于上述结论制定抑制相应频次谐波电流的策略。

## 6 结束语

基于 SVD 方法分析多逆变器并网时控制系统间的交互影响, 以弱电网接入为研究背景, 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, 研究了并网台数、控制参数和电网等效阻抗改变时控制系统交互影响的变化规律。得出结论如下:

① 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 点耦合从而引起逆变器控制系统间的交互作用, 进而影响逆变器并网电流中各频次谐波含量。

② 基于 SVD 方法可定量地分析多逆变器并网时控制通道交互作用, 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交互影响, 而高频段交互影响较为微弱。

## 参考文献

- [1] Blaabjerg F, Teodorescu R, Liserre M, et al. Overview of control and grid synchronization for dis-

- tributed 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.
- [3] 袁越, 曹阳, 傅质馨, 等. 微电网的节能减排效益评估及其运行优化 [J]. 电网技术, 2012, 38(18): 12-18.
- [4] 杨秋霞, 高金玲, 荣雅君, 等. 单相光伏并网系统共模电流分析 [J]. 电网技术, 2011, 35(1): 180-185.
- [5] Joan R, Alvaro L, Frede B. Control of power converters in AC microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11): 4734-4749.
- [6] 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.
- [7] 周林, 张密. 大型光伏电站谐振现象分析 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 8-14.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 胡卫红, 舒泓, 栾宇光. 基于奇异值分解的电能质量信号去噪 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 30-33.
- [11] 刘锋, 姚小寅, 孙元章. 用奇异值分解法对二级电压控制效果的分析 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(18): 1-5.
- [12] 张琳, 曹一家. 基于奇异值分解方法的 FACTS 交互影响分析 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(5): 20-24.
- [13] 王振浩, 姚艳菊, 陈继开. 基于 SVD 方法的多台配电网静止无功补偿器交互影响分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 103-109.

---

收稿日期: 2016-06-01

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, E-mail: tzdinscu@126.com;

杨洪耕(1949—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电能质量、无功电压控制、智能电网等, E-mail: 2687127383@qq.com。

(责任编辑: 杨秋霞)