

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211526

# 新能源逆变系统中 VSG 控制时随机激励的谐波抑制研究

任光照 马家庆 吴钦木 何志琴 陈昌盛 覃涛

(贵州大学电气工程学院 贵阳 550025)

**摘要:** 虚拟同步发电机通过模拟同步发电机的外特性,为系统提供惯量及阻尼支撑,使逆变系统能安全稳定运行。由于新能源逆变系统中非线性负荷的存在,系统的输出谐波受到污染,影响输出的电能质量。为优化系统输出,本文结合 VSG 控制算法,在有噪声的系统 PWM 调制波中引入一个随机激励,再和载波比较而生成驱动信号。通过电压功率谱密度对其谐波分布情况进行分析。仿真结果显示,采用随机激励的方法对 VSG 逆变器的输出电压波形有一定程度的改善,与引入随机激励前相比,输出的 A、B、C 三相电压的总谐波因素(THD)分别降低了 11.32%、11.60% 和 11.42%,表明了本方法的合理性及有效性并适用于工程应用中。

**关键词:** 虚拟同步发电机;随机激励;功率谱密度;随机参数;正交实验

**中图分类号:** TK8 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## Research on harmonic suppression with random excitation for VSG control in new energy inverter system

Ren Guangzhao Ma Jiaqing Wu Qinmu He Zhiqin Chen Changsheng Qin Tao

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** Virtual synchronous generator provides inertia and damping support for the system by simulating the external characteristics of the VSG, so that the inverter system can run safely and stably. Due to the existence of nonlinear load in the new energy inverter system, the output harmonics of the system are polluted, which affects the output power quality. In order to optimize the system output, this paper combined with VSG control algorithm, introduced a random excitation in the noisy system PWM modulation wave, and then compared with the carrier to generate the driving signal. The harmonic distribution is analyzed by voltage power spectral density. Simulation results show that the random excitation method is adopted to VSG inverter output voltage waveform is improved to a certain extent, compared with before introducing random excitation, the output of A, B, C three-phase voltage total harmonic factor(THD)was reduced by 11.32%, 11.60% and 11.42%, respectively, show the rationality and validity of this method and suitable for engineering applications.

**Keywords:** virtual synchronous generator; random excitation; power spectral density; random parameters; orthogonal experiment

## 0 引言

电力系统本身固有的非线性和不稳定性以及随机干扰引起的不确定性等因素<sup>[1]</sup>,使高阶复杂的系统本身输出功率的设计要求具有很大的挑战<sup>[2]</sup>。虚拟同步发电机

(virtual synchronous generator, VSG)控制算法<sup>[3-4]</sup>可以模拟传统的同步发电机(SG)的外特性,为系统提供惯量特性和阻尼特性,提高系统的稳定性<sup>[5-7]</sup>。

由于非线性设备在电力电子器件中的高渗透率,加之控制系统中存在振荡环节,使得含有不同次谐波的系统输

收稿日期:2022-09-26

\* 基金项目:国家自然科学基金(51867006,61861007,62163006)、贵州省科技厅-贵大联合基金(黔科合 L.H 字[2017]7229 号、[2018]5781 号)、黔科合平台人才[2017]5788)、贵州省科技厅(黔科合支撑[2021]一般 442、[2022]一般 264)、智能机电装备设计与应用技术研究团队项目(2021YJTD04)资助

出电压电流会产生不同程度的畸变,进而造成损耗增加,同时还会恶化转矩脉动,弱化了系统的运行性能<sup>[8,12]</sup>。为了抑制此类谐波导致的畸变输出,改善电能质量,维持系统良好的动态特性。在相关文献研究中,通过一种改进电网电压比例前馈控制,采用基于滤波参数优化选择的抑制方法减小了谐波畸变<sup>[13]</sup>。同时也有提出基于差分进化法的单相电压型逆变器 SHEPWM 控制方法以及遗传算法,确定载波开关频率,降低了逆变电源中的低、高次谐波峰值<sup>[14]</sup>。此外,有研究通过一种基于 VSG 控制的分频下垂谐波抑制策略,提取主要谐波成分并快速清理输出谐波<sup>[15]</sup>。然而,上述方法虽然对产生的谐波有一定的抑制效果,但是在实现谐波抑制的同时需要借助复杂的控制算法以及易引起系统不稳定的数字控制器。

对于 VSG 控制系统输出谐波的抑制,现有方法是在产生了谐波后,用滤波的方法来得到较好的正弦波,根据帕斯伐尔定理,谐波带走了一部分直流电源电压的分量,从直流能量传到交流能量的过程中所需基波分量的能量只是直流能量的一部分。用随机激励的方法能直

接减少从直流电源中分走的谐波分量,从而提高从直流能量传到交流能量中所需要的基波分量的能量的比例。在随机激励法的应用研究中,通过采用随机激励的方法构造非线性随机微分方程模型,研究了系统在随机激励下的响应特性,证明了该方法对输出有好的改善效果<sup>[16]</sup>。同时可以通过随机激励法准确高效地反映了电力系统在参数随机扰动下的运行特性,得出电力系统中的开关运行方式会对其电磁兼容性产生很大的影响<sup>[17]</sup>。此外,为能有更好的抑制效果,对数据进行优化筛选,本文采用正交实验设计。

## 1 VSG 数学模型

### 1.1 传统 VSG 控制

虚拟同步机是通过控制算法模拟同步发电机机械功率和电功率之间以及主电路和磁场之间的关系。图 1 为传统 VSG 控制策略拓扑结构。该电路结构部分由三相全桥逆变器、LC 滤波和线路阻抗组成;其控制部分为功频控制器、励磁控制器以及电压电流环和 PWM 发生器。

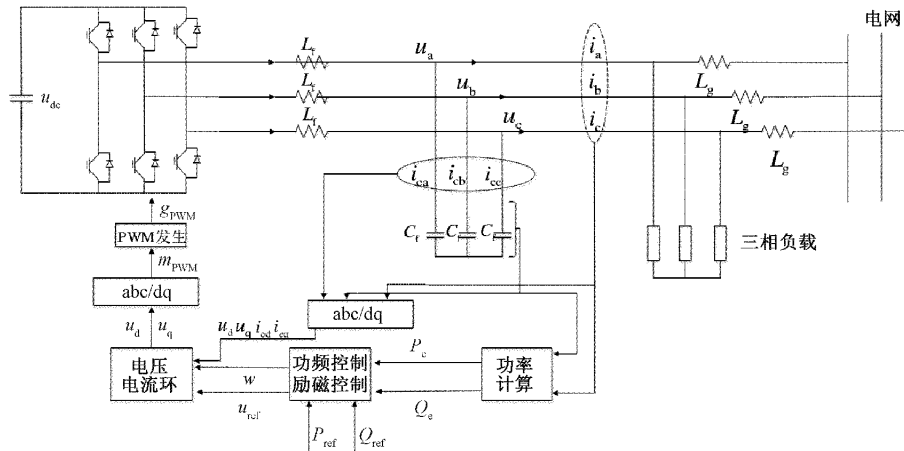


图1 VSG 控制策略

图 1 中,  $u_{dc}$  为直流电压源, 充当 SG 的原动机;  $L_f$ 、 $C_f$  组成逆变器的滤波电;  $u_{abc}$  为 VSG 的输出三相电压;  $i_{abc}$  为输出三相电流;  $L_g$  为并网电阻。图 2 为 VSG 的功频控制器实现原理。

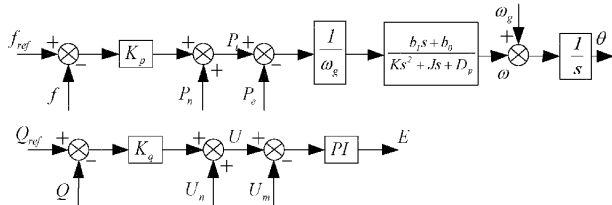


图2 VSG 功频控制器

根据同步发电机的结构与运行特性,其转子运动方程可表示为:

$$T_m - T_e = J \frac{d\omega}{dt} - D_p(\omega - \omega_{ref}) \quad (1)$$

其中,  $J$  为转动惯量,  $\omega$ ,  $\omega_{ref}$  分别为机械角速度和额定角速度;  $T_m$ 、 $T_e$  和  $D_p$  分别为机械转矩、电磁转矩和阻尼系数。通过式(1),可以得到虚拟同步发电机的功频控制方程:

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_{ref}}{\omega} - \frac{P_e}{\omega} - D_p(\omega_{ref} - \omega) \\ \frac{d\sigma}{dt} = \omega_{ref} - \omega \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega_{ref} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\sigma$  和  $\theta$  分别是功角和电角度,  $P_{ref}$  和  $P_e$  分别是额定功率和电磁功率。

### 1.2 引入随机激励的 VSG 控制

对于 VSG 控制系统输出谐波的抑制,现有的研究多以滤波的方式得到较好的正弦波,但是从直流到交流中所需基波分量的能量仅是直流能量的一部分,而采用随机激

励的方法能直接减少从直流电源中分走的谐波分量,从而提高从直流能量传到交流能量中所需基波分量的能量比。该方法的随机激励信号不同于能量信号作用于系统的能量输入端,而是作用在驱动信号的输入端对系统的噪声进行一定程度的抵消或抑制。图 3 为引入随机激励信号的 VSG 控制结构图。

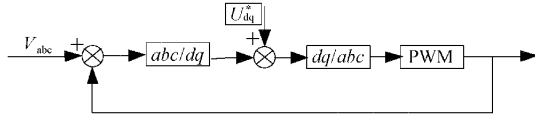


图 3 引入随机激励的 VSG 控制框图

其中,  $U_{din}$  为随机激励信号。

## 2 功率谱密度函数及随机激励的参数选择

VSG 通过模拟同步发电机的外特性,为系统提供惯量和阻尼支撑,从而提高了系统的输出稳定性。然而其输出的电压电流含有不可忽略的白噪声。为抑制此噪声,引入一个随机激励信号,将其视为随着时间而随机变化的随机变量,即可看作一个随机过程  $x(t)$ ,通常需要在变化的过程中研究其状态。

### 2.1 功率谱密度函数

类似于样本函数的情况,对应于随机过程,设:

$$X_T(\omega) = \int_{-T}^T X(t)e^{-j\omega t} dt \quad (3)$$

可知,  $X_T(\omega)$  和样本函数  $x(t)$  的功率谱密度函数皆为随机函数。取  $x(t)$  的功率谱密度函数得数学期望:

$$G_X(\omega) = E[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} |x_T(\omega)|^2] \quad (4)$$

此处,  $G_X(\omega)$  为  $\omega$  的确定函数,此时已不再具有随机性。  $G_X(\omega)$  的物理意义:表示随机过程  $x(t)$  在单频带内在  $1 \Omega$  电阻上消耗的平均功率。  $G_X(\omega)$  被称随机过程  $X(t)$  的功率谱密度函数。

平稳过程的平均功率:

$$R_Y(0) = E[Y^2(t)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_Y(\omega) d\omega \quad (5)$$

则当一个具有各态历经性的随机过程,通过中心频率为  $\omega_0$ 、传递函数为  $H(\omega)$  的线性系统后,可得到输出功率为:

$$E[|Y_{\omega_0}(t)|^2] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_Y(\omega) |H(\omega)|^2 d\omega \quad (6)$$

### 2.2 Welch 功率谱估计法

功率谱估计作为一种十分重要的随机信号分析方法,揭示了被分析信号的能量在频率轴的分布情况,即频谱结构。本文采用 Welch 法对输出信号的功率谱密度进行谱估计。

Welch 法又称修正平均周期图法,是应用较广的一种方法。 Welch 法对  $N$  点的信号  $u_n(n)$  进行分段,同时允许分段时每段信号样本重叠。假设每段的样本长度为  $M$ ,信

号被分为  $L$  段,取相邻两断你的信号样本重叠 50%,则  $L$  满足:

$$L = \frac{N - M/2}{M/2} \quad (7)$$

将每段信号  $u'_N(n)$  和窗函数  $\omega(n)$  相乘,(其中,  $\omega(n)$  可采用矩形窗、三角窗、海明窗或 blackman 窗等),得到每段信号的功率谱估计,为保证修正所得功率谱估计是无偏的,需要对其进行归一化。该方法由于允许分段数据样本的重叠,则可得到更多的周期图估计,从而也进一步减小估计的功率谱密度的方差。

### 2.3 根据功率谱确定激励信号的参数

根据 VSG 三相电压的功率谱密度函数分析得出其频谱为 50 Hz 的基波加上噪声,通过引入随机激励来抵消这部分噪声,方法为在控制器中引入噪声信号:

$$\begin{cases} U_d^* = U_d + A_d N(\mu_d, 1) \\ U_q^* = U_q + A_q N(\mu_q, 1) \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $N(\mu, 1)$  表示平均值为  $\mu$ ,幅值为 1 的高斯白噪声。  $A_d, \mu_d, A_q, \mu_q$  分别为  $d$  轴和  $q$  轴上影响系统输出特性的 4 个随机噪声参数。

根据 VSG 输出 A 相电压波形画出功率谱密度函数图,得到直流分量的电压折算为控制器中的  $A_d, A_q$  的偏移量为 0.004 7 V,并将随机取值范围定为  $[-1, 0.6]$ 。再从功率谱密度函数图的高频部分读出其电压并折算成控制器的电压为 1.479 V,随机取值范围定位  $[0, 4]$ 。在此基础上采用 6 个变量五水平(已经作  $dq$  变换,不考虑交互作用,最后两列为空)的正交实验方法得到较优的水平组合为  $A_d=2, A_q=-1, \mu_d=1, \mu_q=0.2$ 。为减小频谱中由于泄漏带来的测量不准确性,借助 blackman 窗对信号进行处理后得到激励前后的功率谱密度函数图如图 4 所示。

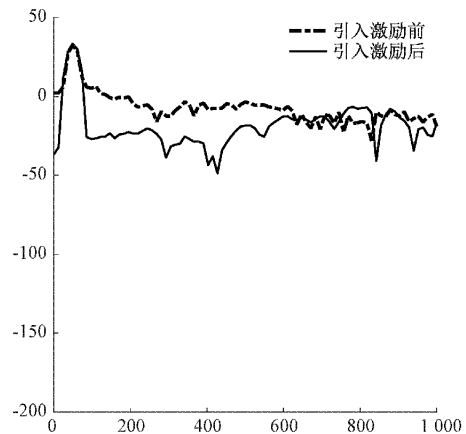


图 4 引入随机激励前后功率谱对比

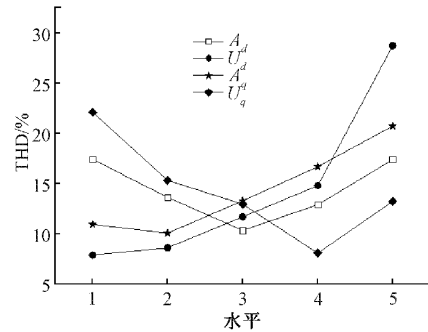
从图 4 看出,系统引入随机激励后输出电压的功率谱密度幅值在频率 0~600 Hz 之间有一定的衰减,表明了随机激励的引入对系统输出有较好的优化效果。

### 3 随机参数的正交实验设计

在实际问题中,通常有多个因子影响性能指标,所以需要涉及多因子的情况对指标影响进行考察,也因此会进行更多组实验。多因子实验问题远比单因子实验问题复杂得多,其中为了减少实验次数,本实验将逐个确定每个因子的水平,并反复进行实验,找出最好的水平组合。这便将多因子实验问题转为多个单因子实验问题。

本实验设计选定  $d$  轴和  $q$  轴 4 个影响系统输出特性的随机参数  $A_d, \mu_d, A_q, \mu_q$  分别作为影响因子 A、B、C、D 这 4 个水平。通过在 MATLAB 仿真平台上对带有随机激励的 VSG 系统进行搭建模型并仿真,对数据处理得图 5。

由图 5 可知,  $A_d, \mu_d, A_q, \mu_q$  这 4 个因素影响下系统的 THD 值取值水平分别为  $A_3, B_1, C_2, D_1$ , 此时,三相电压的 THD 值最小,所以较好的最终水平组合为  $A_3 B_1 C_2 D_1$ 。同时可以看出, B、D 水平为主要因子, C、A 水平次之,即  $d$  轴的参数  $\mu_d$  及  $q$  轴的参数  $\mu_q$  是影响 VSG 系统电压输出特性好坏的主要因素。图 6(a) 为系统未引入随机激励时,即

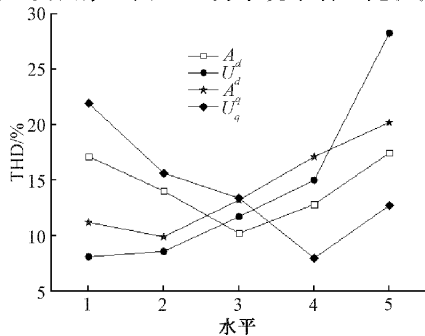


(d) A、B、C相电压THD的平均值

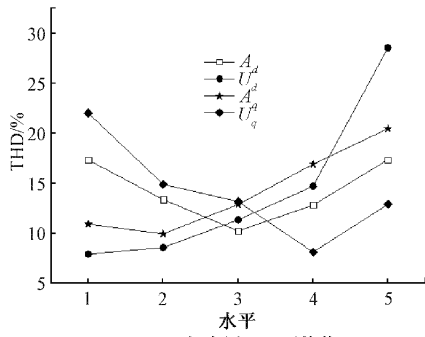
图5 正交实验的4个参数表现

在传统 VSG 控制策略下的三相电压,图 6(b) 为系统引入随机激励后并取经过以上正交实验得出的最佳因素影响水平组合的三相电压。其中,仿真结果对比图中均取 0.20~0.28 s 该时间段内的 4 个周期。

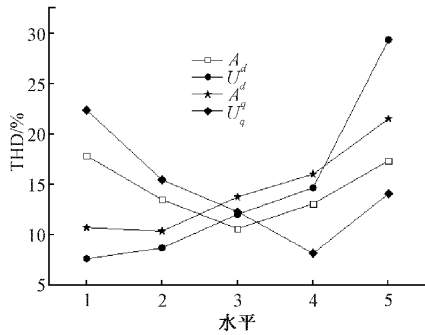
根据图 6 可知,对比引入随机激励前后 A、B、C 三相电压波形,采用随机激励法对虚拟同步发电机控制策略进行优化在谐波抑制方面有较好的效果。



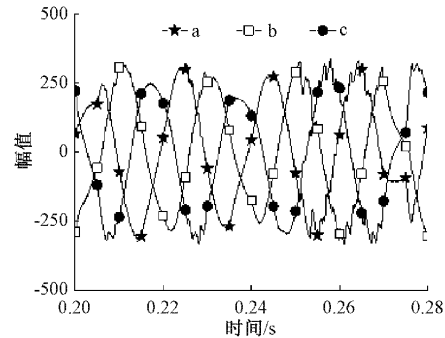
(a) A相电压THD值



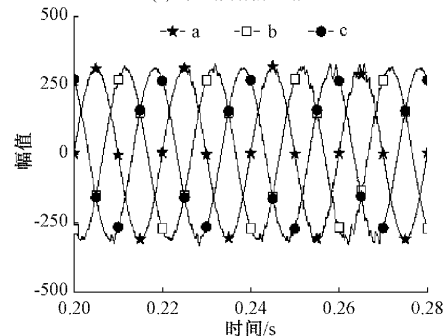
(b) B相电压THD平均值



(c) C相电压THD平均值



(a) 引入激励前三相电压



(b) 引入激励后三相电压

图6 系统引入随机激励前后 A、B、C 三相电压

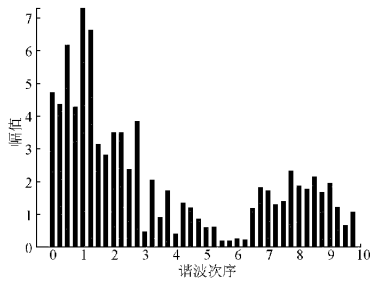
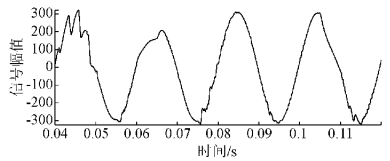
### 4 FFT 的仿真结果分析

三相正弦波信号在时域上为连续的模拟信号,借助 MATLAB 中的 Simulink 模块将系统输出的三相电压波形转换为数字信号,图 7(a)~(c) 和 (d)~(f) 分别为引入激励前和引入激励后两种控制下的 FFT 分析图,其中取起始时间为 0.04 s 的 4 个周期,基波频率为 50 Hz,采样时间取 12 500 Hz。

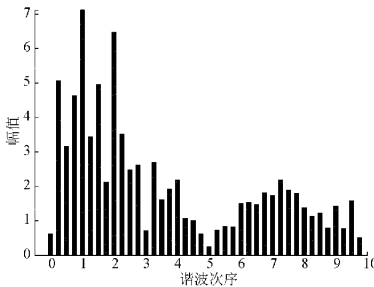
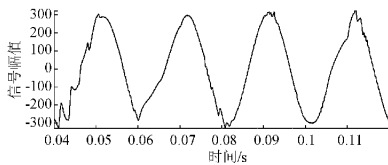
系统三相输出电压经过 FFT 分析计算后其谐波分布特性和相应的频率以及相角关系如图 6 所示,由图可知,在引入随机激励后系统的输出波形更接近于三相正弦波,同时由表 1 和图 7 可看出引入激励前三相电压的 THD 值分别为 13.13%、13.50%和 13.23%,而引入激励后相应的 THD 值分别为 1.81%、1.90%和 1.81%,与引入随机激励前相比,系统输出的 A、B、C 三相电压对应的 THD 值分别降低了 11.32%、11.60%和 11.42%,同时,在控制稳定后,从两种不同控制方式的仿真图中可知 3,5,7 奇次谐波,在引入激励后的控制方式下得到了比较明显地抑制效果。

表 1 引入随机激励前后 A、B、C 三相电压 THD 值

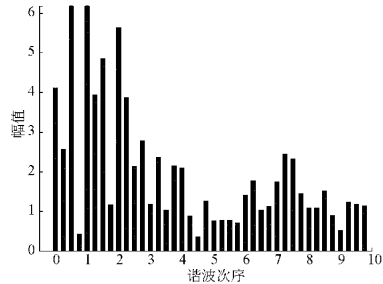
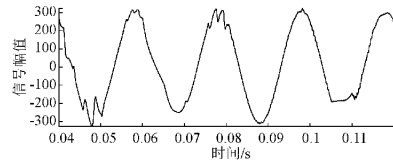
| THD/% | A 相   | B 相   | C 相   |
|-------|-------|-------|-------|
| 激励补偿前 | 13.07 | 13.18 | 13.19 |
| 激励补偿后 | 2.36  | 2.45  | 2.43  |



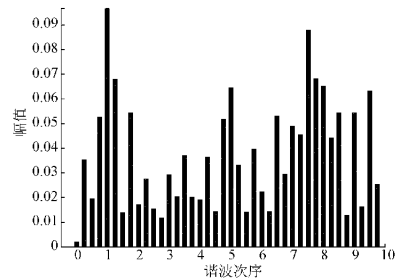
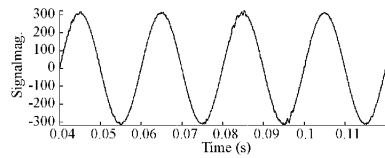
(a) 信号1 FFT分析结果



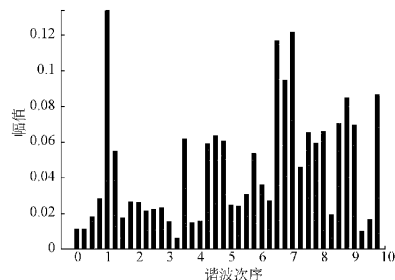
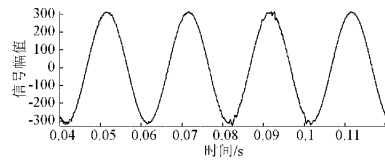
(b) 信号2 FFT分析结果



(c) 信号3 FFT分析结果



(d) 信号1 FFT分析结果



(e) 信号2 FFT分析结果

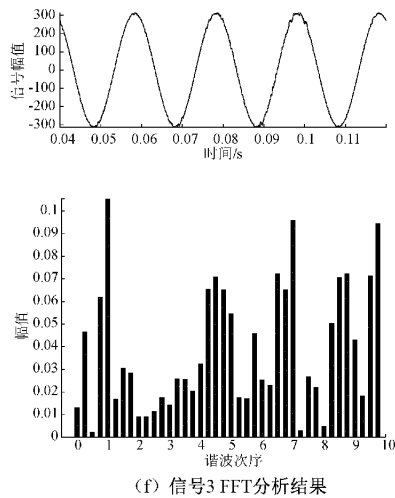


图7 引入激励前后三相电压的FFT分析结果

## 5 结论

本文基于VSG控制算法结合随机激励对输出电压质量进行优化,在具有噪声的系统PWM调制波中引入随机激励,通过和载波比较而生成驱动波形。再对输出电压的功率谱密度进行分析,通过对随机参数进行正交实验设计,确定出较佳水平组合,并将在该水平组合下的三相电压波形与激励补偿前作对比,对输出波形进行比较发现,采用随机激励的方法较好的改善了VSG逆变器的电压输出波形,使其更接近于三相正弦波,同时也有效地抑制了输出电压的谐波分量。这也充分表明了随机激励法在工程应用中的有效性。

## 参考文献

- [1] 何开梅. 电子技术在电力自动化系统中的应用分析[J]. 中国设备工程, 2020(4): 197-198.
- [2] 张兴, 李明, 郭梓暄, 等. 新能源并网逆变器控制策略研究综述与展望[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(5): 506-515.
- [3] LU X J, DUAN J T. A novel control strategy of hybrid micro grid based on VSG technology[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(3): 243-250.
- [4] ARANI M F M, EL-SAADANY E F. Implementing virtual inertia in DFIG-based wind power generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1373-1384.
- [5] 徐海珍, 张兴, 刘芳, 等. 基于超前滞后环节虚拟惯性的VSG控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 1918-1927.
- [6] LIN Z H, RUAN X B, WU L G, et al. Multi resonant component based grid-voltage-weighted

feedforward scheme for grid connected inverter to suppress the injected grid current harmonics under weak grid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 9784-9793.

- [7] 张赞宁, 孙想亮, 付文龙, 等. 参数协调模糊自适应VSG控制策略[J]. 电子测量技术, 2022, 45(21): 1-7.
- [8] 李志军, 杨梦伟, 张家安, 等. VSG惯量及阻尼的协同自适应控制研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(1): 36-43.
- [9] 吴舟, 邹晓松, 袁旭峰, 等. 计及储能动态的VSG惯量阻尼自适应控制研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(12): 83-91.
- [10] 张中华, 李智, 宋鹏, 等. LC型储能虚拟同步发电机谐波谐振机理与抑制策略研究[J]. 可再生能源, 2018, 36(12): 1842-1848.
- [11] ZHONG Q C, NGUYEN P L, MA Z Y, et al. Self-synchronized synchronverters: Inverters without a dedicated synchronization unit[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2014, 29(2): 617-630.
- [12] CHEN Y, HESSE R, TURSCHNER D, et al. Improving the grid power quality using virtual synchronous machines[C]. International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, IEEE, 2011: 1-6.
- [13] SUN J, LIU H C. Sequence impedance modeling of modular multilevel converters [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(4): 1427-1443.
- [14] 丰胜成, 郭继成, 沈少峰, 等. 单相电压型PWM逆变器谐波抑制方法[J]. 机械管理开发, 2022, 37(2): 28-29, 32.
- [15] 廉静如, 张鸽, 张昌华. 具备电压稳定和谐波抑制的分频下垂控制器[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(18): 182-187.
- [16] 陈红坤, 胡畔, 朱晓航, 等. 随机激励下基于微分包含理论的电力系统低频振荡分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(15): 4395-4406.
- [17] 刘咏飞, 鞠平, 薛禹胜, 等. 随机激励下电力系统特性的计算分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 137-142.

## 作者简介

任光照, 硕士研究生, 主要研究方向为控制理论与控制工程。

E-mail: 973062073@qq.com

马家庆(通信作者), 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为交流电机矢量控制及电力电子器件能量传递效率、新能源并网及电力大数据、高温超导磁悬浮。

E-mail: 35728787962@qq.com