

# 虚拟同步整流器的不平衡电压改进控制

缪惠宇, 郑建勇, 顾盼盼, 杨 贇

(东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210009)

**摘要:**随着电力电子装置在电网中的渗透率越来越高,由此带来系统稳定性降低的问题,虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)作为一种新兴的控制策略,能够模拟传统电机特性,使系统具备阻尼与惯性,受到广泛关注。文中以虚拟同步整流器为研究对象,分析虚拟同步整流器的数学模型,研究其控制策略。针对电网出现电压三相不平衡,对其进行功率分析,改进虚拟同步发电机控制策略,稳定直流侧负荷电压。搭建了基于 Matlab/Simulink 的仿真模型,模拟虚拟同步整流器在功率波动和三相不平衡运行,仿真结果验证了文中所提出方法的正确性和有效性。

**关键词:**VSG; 整流; 三相不平衡; 电流补偿

**中图分类号:**TM761

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2017)05-0002-06

## 0 引言

新能源、各种可控负荷以及电力电子装置大规模接入电网,其在电网中所占的比例越来越大<sup>[1-3]</sup>。但随着电力电子装置渗透率的升高,由于其不具备惯性与阻尼,系统易受到功率波动和故障所造成的影响<sup>[4,5]</sup>。为了提高电网的稳定性和安全性,利用电力电子设备灵活可控的特点,必须对其控制策略进行改进,提高其生存能力。

借鉴传统同步发电机的工作原理和思想,虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)的概念在最近得到越来越多专家学者的重视<sup>[6]</sup>。虚拟同步机根据其运行特性,可以分为虚拟同步电动机和虚拟同步发电机2种,其中虚拟同步发电机针对DC/AC逆变器的运行控制策略,而虚拟同步电动机针对电力电子装置整流负荷运行<sup>[7]</sup>。虚拟同步技术是通过模拟同步机的原理,实现有功/无功自主调节,使得电力电子装置在外特性上能够与传统的同步机进行等效,在运行过程中为电网系统提供一定的惯性和阻尼。

目前VSG的控制模型主要有:欧洲VSYNC方案、德国VISMA方案、Synchronverter方案和GEC方案等等<sup>[8]</sup>。文献[9]提出将虚拟同步电机技术应用整流,电压和无功功率能够准确迅速的跟踪参考值。文献[10]提出一种自同步的虚拟同步整流器,实现对电网频率的自动跟踪,无需锁相环等装置。文献[11]将虚拟同步电机技术应用于柔性直流输电中,给出基于VSC的换流站控制方案,并建立直流侧控制的小信号模型。

以上研究均是针对电网理想情况下虚拟同步技术的应用,而在实际运行过程当中,电网可能会出现例如三相不平衡、谐波等异常情况。虚拟同步技术故障穿越控制目前已经有部分专家学者进行该方面的研究。文献[12]研究虚拟同步发电机在不平衡和非线性混合负载情况下的控制策略,采用PI加多谐振并联(PIR)电压控制器对输出电压不平衡与谐波进行抑制,提高系统的稳定性,但整个系统较为复杂。文献[13]当电网发生对称故障时,对虚拟同步发电机进行建模,将虚拟电阻与相量限流方法相结合,该方法目标为抑制暂态电流,并未考虑电网不平衡的情况。文献[14]提出在孤岛微网中,虚拟同步发电机的不平衡电压控制策略,采用复系数滤波器快速检测负序电流,实现VSG序网络阻抗解耦控制。上述多种方法均是针对虚拟同步机的故障穿越研究,而针对虚拟同步整流器的故障控制目前研究的较少。

文中针对虚拟同步整流器,搭建其数学模型,分析其控制策略。针对电网出现电压三相不平衡的情况,对其进行功率分析,提出一种改进型的虚拟同步整流器控制策略,以达到稳定直流侧电压的控制目标。在Matlab/Simulink中搭建仿真模型,验证本文所提出的控制策略的有效性和可行性。

## 1 虚拟同步整流模型及其控制

### 1.1 虚拟同步整流的数学模型

三相整流电路的基本结构框图如图1所示。主要由三相桥、滤波电感 $L_s$ 、直流滤波电容 $U_{dc}$ 等组成<sup>[15]</sup>,根据虚拟同步机的思想,可以将三相整流电路等效为一个同步机。

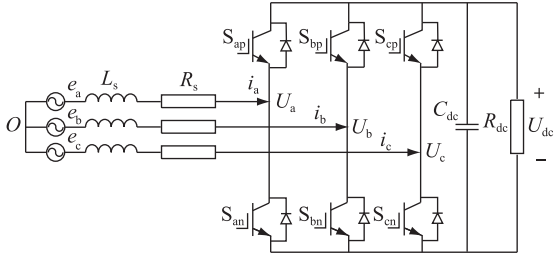


图1 三相整流结构示意图

Fig.1 Diagram of three phase rectifier

根据 Kirchhoff 定律,将三相整流电路的数学模型表示为:

$$L_s \frac{di_{abc}}{dt} = e_{abc} - u_{abc} - R_s i_{abc} \quad (1)$$

式(1)中: $L_s$ 为滤波电感值; $i_{abc}$ 为整流电路三相输入电流; $e_{abc}$ 为三相电网电压; $u_{abc}$ 为三相桥臂点电压; $R_s$ 为桥臂等效电阻和滤波电感中的等效电阻。在文中之后的讨论中,忽略交流滤波电容对整个系统的影响。

考虑到同步电机的机械和电磁方程,可以将虚拟同步整流器的机械方程表示为<sup>[16]</sup>:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_c - T_m - D_p(\omega - \omega_0) \quad (2)$$

式(2)中: $J$ 为虚拟同步整流器的转动惯量; $\omega$ 为虚拟同步整流器的机械角速度; $T_c$ 为虚拟电磁转矩; $T_m$ 为虚拟机械转矩; $D_p$ 为阻尼系数; $\omega_0$ 为额定角速度。其中,电磁转矩  $T_c$  可以通过测量得到的输入电压和电流值进行计算<sup>[17]</sup>,则:

$$T_c = P_e / \omega = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / \omega \quad (3)$$

式(3)中: $P_e$ 为三相整流电路的输入功率。

三相整流电路的输入滤波电感可以等效为虚拟同步整流器的同步电感,而滤波电感和三相桥中功率元件的等效电阻同样可以等效为同步电阻。引入转动惯量  $J$ ,使得三相整流电路在功率/频率出现波动的过程中存在一定的惯性,引入虚拟阻尼  $D$ ,使得三相整流电路能够类似同步机存在功率振荡的情况。在三相整流负荷中引入  $J$  和  $D$  这 2 个变量,能够大大改善微网中整流负荷的运行性能。

## 1.2 虚拟同步整流器的控制策略

根据式(2)同步机的机械方程,可以得到虚拟同步整流器的控制框图,如图2所示<sup>[11]</sup>。

图2中,直流电压环部分,保持整流电路直流侧电压稳定,比例积分控制器输出作为虚拟机械转矩,按照式(2)最终得到输出电压的相角与角频率。无功控制部分采用下垂控制的原理,其中  $k_q$  为无功功率调节系数,  $Q_{set}$  为无功功率设置初始值,  $E_0$  为电

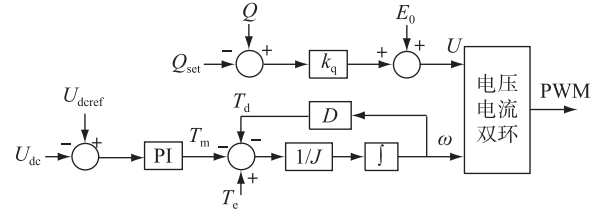


图2 虚拟同步整流器控制框图

Fig.2 Control diagram of virtual synchronous rectifier

压设置初始值,  $U$  为整流网侧输出电压幅值,  $\omega$  为网侧输出电压角速度。

## 2 电压不平衡时系统建模及分析

### 2.1 电压不平衡功率分析

当电网电压出现不平衡时,根据所测量得到的电压矢量和电流矢量可以计算得到整流器的复功率  $S$ <sup>[18]</sup>,即:

$$\frac{2}{3} S = \mathbf{E} \cdot \mathbf{I}^* = (E_+ e^{j\omega_g t} + E_- e^{-j\omega_g t}) \cdot (I_+ e^{-j\omega_g t} + I_- e^{j\omega_g t}) \quad (4)$$

式(4)中: $\mathbf{E}$ 为网侧电压矢量; $\mathbf{I}^*$ 为电流矢量的共轭; $E_+$ ,  $E_-$ 分别为网侧正序和负序电压矢量的幅值; $I_+$ ,  $I_-$ 分别为整流输入的正序和负序电流矢量幅值; $\omega_g$ 为网侧电压的基波频率。

由此,瞬时有功功率  $P$  为<sup>[19]</sup>:

$$\frac{2}{3} P = \text{Re} \left[ \frac{2}{3} S \right] = P_0 + P_{c2} \cos(2\omega t) + P_{s2} \sin(2\omega t) \quad (5)$$

式(5)中: $P_0$ 为有功功率平均值; $P_{c2}$ 为按余弦分布的有功功率; $P_{s2}$ 为按正弦分布的有功功率。

瞬时无功功率  $Q$  为<sup>[19]</sup>:

$$\frac{2}{3} Q = \text{Im} \left[ \frac{2}{3} S \right] = Q_0 + Q_{c2} \cos(2\omega t) + Q_{s2} \sin(2\omega t) \quad (6)$$

式(6)中: $Q_0$ 为无功功率平均值; $Q_{c2}$ 为按余弦分布的无功功率; $Q_{s2}$ 为按正弦分布的无功功率。

根据 PARK 变换,将上述有功无功由  $abc$  三相坐标系切换至  $dq$  坐标系下进行表示,可以得到:

$$\frac{2}{3} \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \\ P_{c2} \\ P_{s2} \\ Q_{c2} \\ Q_{s2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_d^+ & E_q^+ & E_d^- & E_q^- \\ E_q^+ & -E_d^+ & E_q^- & -E_d^- \\ E_d^- & E_q^- & E_d^+ & E_q^+ \\ E_q^- & -E_d^- & -E_q^+ & E_d^+ \\ E_q^- & -E_d^- & E_q^+ & -E_d^+ \\ -E_d^- & -E_q^- & E_d^+ & E_q^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d^+ \\ I_q^+ \\ I_d^- \\ I_q^- \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(7)中: $E_d^+, E_q^+$ 分别为网侧正序电压分量在  $d$  轴和  $q$  轴上的分量; $E_d^-, E_q^-$ 分别为网侧负序电压分量在  $d$  轴和  $q$  轴上的分量; $I_d^+, I_q^+$ 分别为正序电流分量在  $d$  轴和  $q$  轴上的分量; $I_d^-, I_q^-$ 分别为负序电流分量在  $d$  轴和  $q$  轴上的分量。

当电网出现三相电压不平衡的情况,不同的控制目标,例如输出电流平衡、平抑直流侧电压波动、平抑无功功率等,其控制策略也不同。针对输出电流平衡,此时需保持电流的负序分量为0;针对无功平衡,此时需保证  $Q_{c2} \cos(2\omega t) = Q_{s2} \sin(2\omega t) = 0$ 。

文中针对整流器,优先需要保证直流侧负载正常运行,直流电压保持稳定。在未加入其他设备的情况下,无法保证网侧电流平衡。根据式(5)可得,当直流侧电压保持恒定时,有功功率  $P$  应该同样保持恒定,此时需令有功的2倍频波动分量为0,即  $P_{c2} \cos(2\omega t) = P_{s2} \sin(2\omega t) = 0$ ,则必须满足:

$$\begin{cases} i_{dref}^+ = P_{ref} / [e_d^+ (1 - k_d^2 - k_q^2)] \\ i_{qref}^+ = Q_{ref} / [e_d^+ (1 + k_d^2 + k_q^2)] \\ i_{qref}^- = k_d i_{dref}^+ - k_q i_{qref}^+ \\ i_{dref}^- = k_q i_{dref}^+ + k_d i_{qref}^+ \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中: $k_d, k_q$ 分别为网侧电压  $d$  轴和  $q$  轴分量的不平衡度。

$k_d, k_q$ 也可以表示为:

$$\begin{cases} k_d = \frac{E_d^-}{E_d^+} \\ k_q = \frac{E_q^-}{E_q^+} \end{cases} \quad (9)$$

## 2.2 改进型虚拟同步整流控制策略

当三相电压平衡时,此时正负序电流的参考值为:

$$\begin{cases} i_{dref}^+ = P_{ref} / e_d^+ \\ i_{qref}^+ = Q_{ref} / e_d^+ \\ i_{qref}^- = 0 \\ i_{dref}^- = 0 \end{cases} \quad (10)$$

将式(10)与式(8)进行比较,当需保证直流侧电压保持恒定,需要对电流的参考值进行补偿,其补偿值为:

$$\begin{cases} \Delta i_{dref}^+ = i_{dref}^+ (k_d^2 + k_q^2) / (1 - k_d^2 - k_q^2) \\ \Delta i_{qref}^+ = -i_{qref}^+ (k_d^2 + k_q^2) / (1 + k_d^2 + k_q^2) \\ \Delta i_{qref}^- = -k_d i_{dref}^+ - k_q i_{qref}^+ \\ \Delta i_{dref}^- = -k_q i_{dref}^+ - k_d i_{qref}^+ \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中: $\Delta i_{dref}^+, \Delta i_{qref}^+$ 分别为正序电流在  $d$  轴和  $q$  轴上的补偿值; $\Delta i_{dref}^-, \Delta i_{qref}^-$ 分别为负序电流在  $d$  轴和  $q$

轴上的参考值。

经过改进之后,VSG的电流环部分控制框图如图3所示。其中,电流负序分量在  $d$  轴和  $q$  轴上的初始参考值  $i_{dref}^-, i_{qref}^-$  设置为0。电流环经过补偿之后进行跟踪,之后  $d$  轴和  $q$  轴的电压参考值正负序分量相加,得到  $d$  轴和  $q$  轴的电流参考值,经过反PARK变换之后,最终得到桥臂电压的参考值。

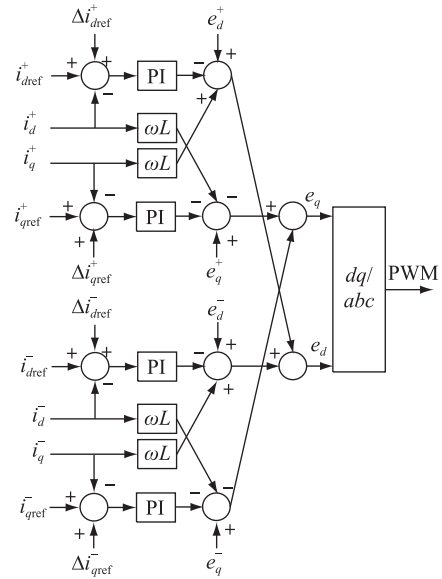


图3 改进后的虚拟同步整流器控制框图

Fig.3 Improved control diagram of virtual synchronous rectifier

## 3 仿真实验

为了验证文中所提出的方法对三相不平衡抑制的有效性,文中在 Matlab/Simulink 软件中搭建相应的仿真,建立虚拟同步整流器及其三相不平衡模型。负荷网侧的相电压有效值为 220 V,交流侧并网滤波电感为 2 mH,滤波电容为 30 μF。直流负荷侧的电压设置为 800 V,直流侧负荷初始值为 3.2 kW,稳压电容为 2200 μF。仿真中的其他主要控制参数如表 1 所示。

表 1 虚拟同步整流器仿真部分参数

Table 1 Simulation parameters of virtual synchronous rectifier

仿真参数	数值
虚拟转动惯量 $J$	0.025
虚拟阻尼 $D$	10
额定输出频率 $f_o/\text{Hz}$	50
$K_p$	0.1
$K_i$	0.5
$K_Q$	0.007
$U_0$	311
$\omega_0/\text{rad}$	314

初始时,负载侧电容并未进行预充电,直流侧功率负载设置为 3.2 kW;当 0.8 s 时,功率负载切换为 6.4 kW;在 1.5 s 时,直流侧功率负载再次切换至 3.2 kW。此时,虚拟同步整流器直流侧电压和并网频率分别如图 4 和图 5 所示。由此可见,正常运行后直流侧电压稳定至 800 V,当负载发生突变后,直流侧电压经过波动后依旧稳定至 800 V,并网频率经过阻尼变化之后,依旧保持稳定。其交流侧 a 相电流如图 6 所示,整流器网侧电流能够平滑过渡并保持稳定。虚拟同步整流器输出的功率波形如图 7 所示,当直流侧功率发生波动后,虚拟同步整流器其输出功率准确跟踪负荷,并能够平滑的实现功率切换,大大降低了功率波动对电网的冲击。

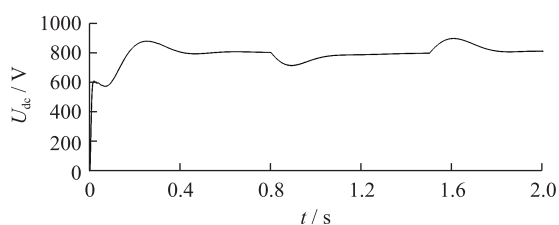


图 4 直流侧电压波形

Fig.4 Voltage diagram in DC side

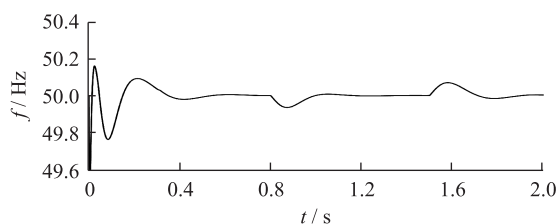


图 5 整流器并网频率

Fig.5 Frequency diagram of rectifier in the AC side

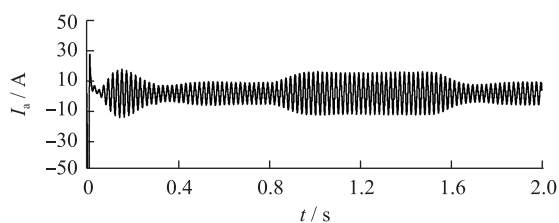


图 6 整流器网侧 a 相电流

Fig.6 Current diagram in phase a of rectifier

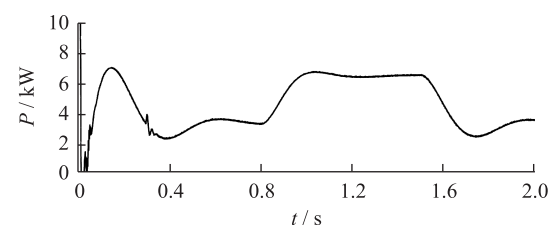


图 7 输出功率波形

Fig.7 Diagram of output

文中提出的算法针对交流侧出现不平衡的情况,仿真中当直流侧功率负载为 6.4 kW 时,a 相电压幅值为 211 V,b 相电压幅值为 111 V,c 相电压幅值保持正常 311 V,由此形成三相不平衡工作情况。网侧电流如图 8 所示,此时电流出现三相不平衡的情况。直流侧的负载电压如图 9 所示,此时直流侧电压出现 2 倍频波动,波动幅值接近  $\pm 10$  V 左右。

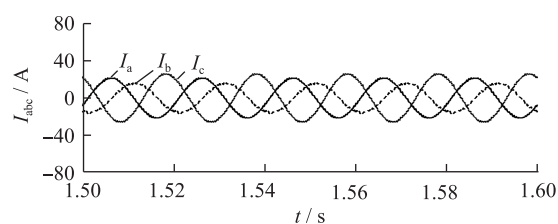


图 8 整流器网侧电流

Fig.8 Current diagram of rectifier in AC side

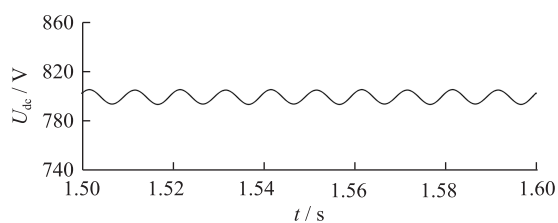


图 9 直流侧电压波形

Fig.9 Voltage diagram in DC side

采用文中所提出的控制策略之后,当出现三相电压不平衡时,此时网侧的电流如图 10 所示。直流侧的电压波动如图 11 所示。从图 11 中可以看出,直流侧电压能够在 800 V 附近稳定,此时电压波动幅值已经抑制至  $\pm 3$  V 左右,相比未采用改进算法,波动幅值减小近 75% 左右。

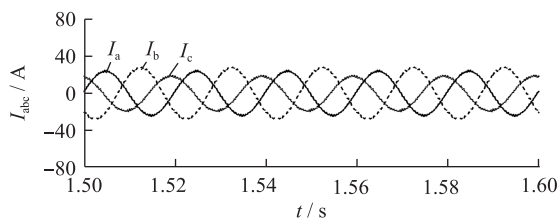


图 10 整流器网侧电流

Fig.10 Current diagram of rectifier in AC side

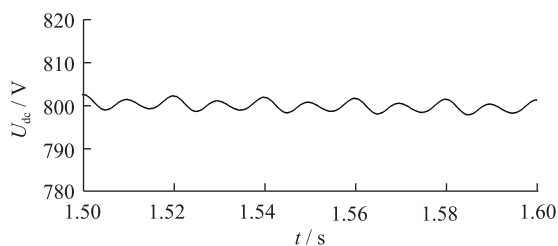


图 11 直流侧电压波形

Fig.11 Voltage diagram in DC side



## 4 结论

文中基于虚拟同步机技术,针对整流负荷的运行状,研究了一种电网电压三相不平衡策略,并根据理论搭建响应的仿真模型,得出以下结论:

(1) 针对虚拟同步整流器分析其数学模型,使得负荷系统存在一定的阻尼,在保证负荷电压稳定的情况下,负荷波动具备惯性与阻尼。

(2) 当电网电压三相不平衡时,通过改进电流内环,添加补偿分量,实现直流侧电压 2 倍频波动抑制。

(3) 仿真验证了虚拟同步整流器的惯性与阻尼特性,当三相不平衡的情况,采用虚拟同步整流器改进控制策略,能够抑制直流侧电压波动达 75%。

针对电网异常情况下虚拟同步机运行方式的研究刚刚起步。文中的研究仅仅针对三相不平衡情况下,抑制直流侧 2 倍频波动控制策略。当电网中谐波与三相不平衡同时存在,以及电网电压出现跌落的情况下,虚拟同步机的控制策略值得下一步继续进行研究。

### 参考文献:

- [1] 陈 炜,艾 欣,吴 涛,等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):26-32.  
CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-32.
- [2] 张 明,周冬旭,嵇文路,等. 含源网荷的智能配电网运行仿真平台研究及应用[J]. 电力工程技术,2017(2):66-71.  
ZHANG Ming, ZHOU Dongxu, JI Wenlu, et al. Research and application of intelligent distribution network operation simulation platform contains the source and network [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017(2): 66-71.
- [3] VISSCHER K, DE HAAN S W H. Virtual synchronous machines (VSG's) for frequency stabilisation in future grids with a significant share of decentralized generation[C]. Smart Grids for Distribution, 2008. IET-CIRED. CIRED Seminar. IET, 2008: 1-4.
- [4] 汪少勇. 基于分布式电源的微网的设计与运行[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4): 120-123.  
WANG Shaoyong. Design and operation of micro-grid based on distributed generation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 120-123.
- [5] 郭小强,刘文钊,王宝诚,等. 光伏并网逆变器不平衡故障穿越限流控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5155-5162.  
GUO Xiaoqiang, LIU Wenzhao, Wang Baocheng, et al. Fault ride through control of PV grid-connected inverter with current-limited capability under unbalanced grid voltage condition [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5155-5162.
- [6] D'ARCO S, SUUL J A, Fosso O B. Control system tuning and stability analysis of Virtual Synchronous Machines [C]. Energy Conversion Congress and Exposition. IEEE, 2013: 2664-2671.
- [7] 钟庆昌. 虚拟同步机与自主电力系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 336-348.  
ZHONG Qingchang. Virtual synchronous machines and autonomous power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 336-348.
- [8] 刘 芳. 基于虚拟同步机的微网逆变器控制策略研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2015.  
LIU Fang. Research on microgrid inverter control strategy based on virtual synchronous generator [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [9] MA Z, ZHONG Q C, YAN J D. Synchronverter-based control strategies for three-phase PWM rectifiers [C] // Industrial Electronics and Applications. IEEE, 2012: 225-230.
- [10] ZHONG Q C, MA Z, NGUYEN P L. PWM-controlled rectifiers without the need of an extra synchronization unit [C] // IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Montreal, QC, 2012: 691-695.
- [11] 高丙团,夏超鹏,张 磊,等. 基于虚拟同步电机技术的VSC-HVDC整流侧建模及参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 534-543.  
GAO Bingtuan, XIA Chaopeng, ZHANG Lei, et al. Modeling and parameters design for rectifier side of VSC-HVDC based on virtual synchronous machine Technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 534-543.
- [12] 石荣亮,张 兴,刘 芳,等. 不平衡与非线性混合负载下的虚拟同步发电机控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6086-6095.  
SHI Rongliang, ZHANG Xing, LIU Fang, et al. A control strategy for unbalanced and nonlinear mixed loads of virtual synchronous generators [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6086-6095.
- [13] 尚 磊,胡家兵,袁小明,等. 电网对称故障下虚拟同步发电机建模与改进控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 403-411.  
SHANG Lei, HU Jiabing, YUAN Xiaoming, et al. Modelling and improved control of virtual synchronous generators under symmetrical faults of grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 403-411.
- [14] 曾 正,邵伟华,李 辉,等. 孤岛微网中虚拟同步发电机不平衡电压控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 372-380.  
ZENG Zheng, SHAO Weihua, LI Hui, et al. Unbalanced voltage control of virtual synchronous generator in islanded micro-grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 372-380.
- [15] 张 兴,张崇巍. PWM整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2012.  
ZHANG Xing, ZHANG Chongwei. PWM rectifier and its control [M]. Beijing: China Machine Press, 2012.

[16] 吕志鹏,蒋雯倩,单 杨,等. 基于负荷虚拟同步机的三相电压型 PWM 整流器[J]. 供用电,2017,34(4):47-51.  
 LYU Zhipeng, JIANG Wenqian, SHAN Yang, et al. Three phase boost type PWM rectifier based on virtual synchronous machine technology[J]. Distribution and Utilization, 2017, 34(4):47-51.

[17] ZHAO H, YANG Q, ZENG H. Multi-loop virtual synchronous generator control of inverter-based DGs under microgrid dynamics[J]. Iet Generation Transmission & Distribution, 2017, 11(3):795-803.

[18] 徐 友,郑建勇,梅 军,等. 空间相位解析的三相并网逆变器不平衡控制策略[J]. 电工技术学报,2013,28(4):133-139.  
 XU You, ZHENG Jianyong, MEI Jun, et al. A novel control strategy for three-phase grid-connected inverter based on space phase analysis under unbalanced input voltage condition [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 133-139.

[19] 袁旭峰,高 璐,文劲宇,等. VSC-HVDC 三相不平衡控制策略[J]. 电力自动化设备,2010,30(9):1-5.  
 YUAN Xufeng, GAO Lu, WEN Jinyu, et al. Unbalanced three-phase control strategy of VSC-HVDC system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 28(4):133-139.

作者简介:



缪惠宇

缪惠宇(1992—),男,江苏南京人,博士研究生,研究方向为新能源接入及微网控制(E-mail:mhy034@163.com);

郑建勇(1966—),男,江苏南京人,博士生导师,研究方向为电力电子与电力传动(E-mail:zhengjy\_seu@163.com);

顾盼盼(1993—),男,江苏南京人,硕士研究生,研究方向为电力电子(E-mail:1052-736883@qq.com);

杨 赞(1993—),男,江苏南京人,硕士研究生,研究方向为电力电子(E-mail:seanyangyy@qq.com)。

## Improved Control of Virtual Synchronous Rectifier with Unbalanced Voltage

MIAO Huiyu, ZHENG Jianyong, GU Panpan, YANG Yun

(School of Electrical Engineering Southeast University, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** With the increasing penetration of power electronic devices in the grid, which make the whole system unstable, virtual synchronous generator (VSG), as a new control strategy, can simulate the characteristics of traditional motors and make the system inertial and damped. It get a wide range of concerns. In this paper, virtual synchronous rectifier is analyzed with mathematical model. Under the condition of grid voltage unbalanced, the virtual synchronous generator control strategy is improved in for the purpose of stable DC voltage. The simulation results based on Matlab/Simulink are verified, which simulate the operation of power fluctuation and three-phase unbalance. The simulation results verify the correctness and validity of the proposed method.

**Key words:** VSG; rectifier; voltage unbalance; current compensation

(编辑 徐林菊)