

# 孤岛微电网中的虚拟同步发电机并联控制策略

施荣<sup>1</sup>,王涛<sup>2</sup>,李宁<sup>3</sup>,陈宁<sup>4</sup>

(1. 国网陕西省电力公司经济技术研究院, 陕西 西安 710065; 2. 华北电力科学研究院有限责任公司西安分公司, 陕西 西安 710065; 3. 西安理工大学自动化学与信息工程学院, 陕西 西安 710048; 4. 中国电力科学研究院有限公司南京分院, 江苏 南京 210013)

**摘要:** 针对微网中的虚拟同步发电机(VSG)技术, 首先提出了适用于孤岛微电网的VSG控制策略, 并对其进行了详细的分析和介绍; 其次, 针对不同容量VSG并联, 考虑并联系统投切负载时系统动态特性, 提出了一种基于惯性时间常数匹配和阻抗匹配的参数设计方法, 使得VSG并联系统在投切负载过程中有功和无功率具有良好的动态特性; 最后, Matlab/Simulink仿真结果和小功率实验结果验证了所提控制策略和参数设计方法是正确有效的。

**关键词:** 微电网; 虚拟同步机; 不同容量; 参数设计

**中图分类号:** TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd20043

## Parallel Control Strategy of Virtual Synchronous Generator in Isolated Microgrid

SHI Rong<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>2</sup>, LI Ning<sup>3</sup>, CHEN Ning<sup>4</sup>

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Company Economic Research Institute, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 2. North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an Branch, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 3. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 4. China Electric Power Research Institute Nanjing Branch, Nanjing 210013, Jiangsu, China)

**Abstract:** Aiming at the technology of virtual synchronous generator (VSG) in microgrid, the VSG control strategy suitable for island microgrid was put forward firstly, and its detailed analysis and introduction was made. Secondly, considering the dynamic characteristics of parallel system when switching on and off loads for different capacities of VSG in parallel, a parameter design method based on inertial time constant matching and impedance matching was proposed to make the active and reactive power of VSG parallel system have good dynamic characteristics in the process of switching load. Finally, Matlab/Simulink simulation results and low power experimental results verify the correctness and effectiveness of the control strategy and parameter design method proposed in this paper.

**Key words:** microgrid; virtual synchronous generator (VSG); different capacity; parameter design

微网是一种将分布式电源、负荷、储能装置、变换器以及监控保护装置有机整合在一起的小型发配电系统<sup>[1-2]</sup>; 交流微网通常通过DC-AC变流器将储能或新能源发电单元与交流母线连接, 因此, 微网中的DC-AC变流器控制策略显得尤为

重要; VSG因其具备下垂特性、虚拟惯量特性、虚拟阻抗等特性受到了广大学者的关注<sup>[3-8]</sup>。

针对VSG应用于交流微电网, 文献[9-10]分别提出应用于微网的VSG技术, 详细分析了单台VSG离网、并网、离并网切换等VSG关键技术, 但

**基金项目:** 国家自然科学基金(51507140); 国家留学基金委国际清洁能源拔尖人才项目([2018]5046); 电气绝缘与电力设备国家重点实验室开放基金(EIPE 17209); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2018JM5041); 广东省清洁能源技术重点实验室开放基金(2014 B030301022); 江苏省智能配电网协同创新中心开放基金(XTCX201703)

**作者简介:** 施荣(1977—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, Email: shirong013@163.com

并未涉及到VSG并联;针对VSG并联系统,文献[11]提出一种独立微网中VSG频率自恢复控制策略,在无需通信的情况下实现微网母线频率的二次调整,提高微网频率稳定性;文献[12]针对VSG多机并联稳定性展开研究,通过参考电力系统两机并联小信号模型,提出了提高VSG并联系统稳定性的方法;文献[13]提出多VSG并联组成的微电网的离网运行策略,包括离网功率分配、微网母线电压和频率的二次调整;文献[14]针对多机并联独立型微电网中的VSG技术进行研究,提出转动惯量自适应的控制方法,在不同工况下转动惯量自适应变化,提高VSG并联系统稳定性;文献[15]研究了转动惯量对VSG并联系统频率和有功功率稳定性的影响,提出在暂态期间通过对惯性时间常数的控制从而提高稳定性;但上述文献并未涉及到不同容量VSG并联。文献[16]针对VSG主要控制参数对系统稳定性及动态响应的影响进行了分析,提出了虚拟同步发电机多机并联运行的虚拟惯量匹配方法,提高系统稳定性,但并未给出适用于不同容量VSG并联的虚拟惯量、阻尼系数、阻尼阻抗,调频系数等关键参数之间的关系。

本文针对VSG并联技术展开研究,研究了不

同容量VSG并联控制技术。首先,介绍了一种适用于微电网的VSG控制策略,相比传统带无功电压环的VSG,该策略能够降低离网工况下电压的跌落程度;其次,针对VSG控制策略下两台不同容量VSG并联控制技术展开研究,对并联预同步算法进行了介绍,详细探讨了两台不同容量VSG并联参数设计,提出了基于惯量匹配和阻抗匹配的参数设计方法;最后,搭建了两台逆变器并联的Matlab/Simulink仿真模型,并搭建了两台1 kW的两电平逆变器实验平台,仿真和实验结果验证了采用本文所提适用于不同容量VSG并联的参数设计是正确有效的,在满足不同容量功率均分的同时,使得VSG并联系统具有良好的动态特性。

### 1 VSG控制策略

本文所采用的适用于孤岛微网的VSG模型对外采样接口有电网电压采样、机端电压采样和电感电流采样;VSG模型分别由功频控制器、励磁控制器、定子电气方程及预同步单元组成;内环采用电压电流双闭环控制,VSG模型生成电压指令和相角。

图1为VSG控制策略示意图。

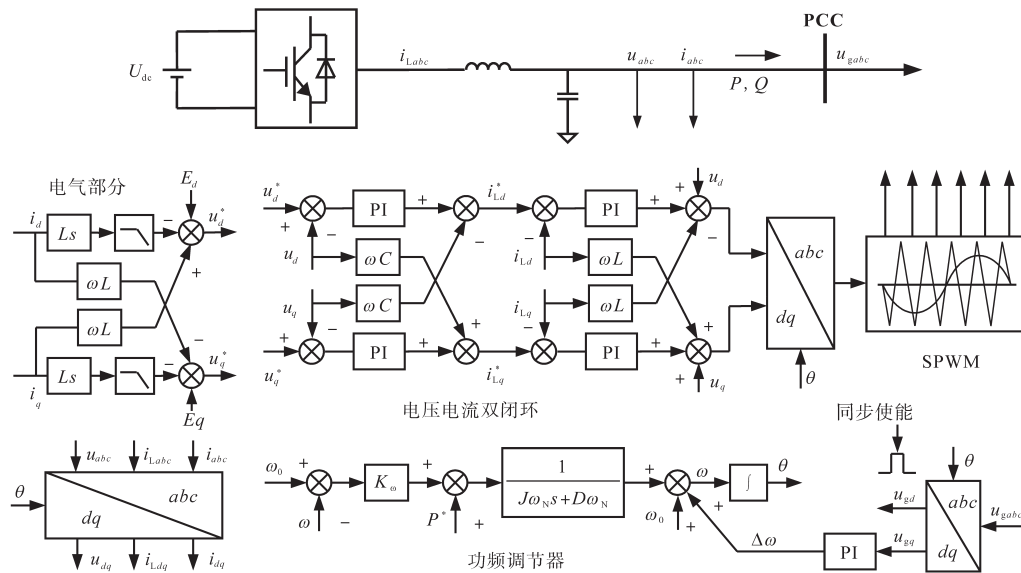


图1 VSG控制策略

Fig.1 VSG control strategy

#### 1.1 功频控制器

原动机调节和转子运动方程共同构成功频调节器,同步发电机转子运动方程为<sup>[9]</sup>

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D\Delta\omega \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $T_m$  和  $T_e$  分别为虚拟机械转矩和电磁转矩;  $D$  为常阻尼系数;  $J$  为转动惯量;  $\omega$  为角速度;  $\delta$  为功角;  $\omega_0$  为额定角速度。

原动机调节为

$$T_m = T_0 + K_\omega(\omega_0 - \omega) \quad (2)$$

式中:  $T_0$  为给定电磁转矩;  $K_\omega$  为一次调频系数。

### 1.2 定子电气方程

VSG 电气部分采用了同步发电机的二阶方程,如下式:

$$\begin{cases} u_d = E_d - Ri_d - L \frac{di_d}{dt} + \omega Li_q \\ u_q = E_q - Ri_q - L \frac{di_q}{dt} - \omega Li_d \end{cases} \quad (3)$$

式中: $E_d$ 和 $E_q$ 为有励磁控制器生成的内电势 $dq$ 分量; $u_d$ 和 $u_q$ 为VSG机端电压反馈 $dq$ 分量; $L$ 为虚拟电感, $R$ 为虚拟电阻。

为简化控制,取 $E_d$ 为恒定值,取 $E_q=0$ 。为了保证VSG输出阻抗呈感性,令 $r=0$ 。

根据式(3)可得到如图1所示的定子电气方程部分。

本文引入文献[17]方法,利用VSG虚拟同步电抗实现无功电压下垂特性,从而实现VSG并联无功功率分配。虚拟阻抗电压降向量图如图2所示。

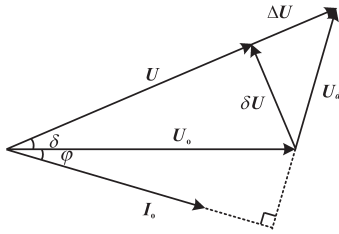


图2 虚拟阻抗电压降落向量图

Fig.2 Vector diagram of voltage drop of virtual impedance

根据电力系统潮流计算<sup>[18]</sup>,得出关于虚拟电抗两端电压的关系,如下式:

$$u = E_d - \frac{\omega L}{E_d} Q \quad (4)$$

式中: $u$ 为VSG机端电压; $Q$ 为VSG输出无功。

可见,虚拟同步电抗的存在使得VSG输出电压和无功功率之间存在下垂关系,且由于删除了无功电压下垂环,进一步减小了无功功率引起的交流母线电压跌落,提高供电电压质量。

## 2 不同容量VSG并联控制方法

同容量VSG并联,其参数是完全一致的,不考虑线路阻抗时,无论是动态还是稳态其有功和无功功率总能够均分;而不同容量VSG并联时,通过合理设置阻尼系数和一次调频系数,稳态有功功率总可以按照下垂系数均分,但若并联系统加减载时,如果两台VSG的频率下降至稳态的曲线不重合,那么VSG并联系统将会产生动态功率环流,威胁并联系统的稳定运行;因此本文研究了一种不同容量VSG并联控制方法,在满足稳态

功率均分的同时,具备良好的动态特性。现将这种控制方法原理予以详细推导。

设动态加减载动态过程中的VSG<sub>1</sub>和VSG<sub>2</sub>有功功率变化量分别为 $\Delta P_1$ 和 $\Delta P_2$ ,对应的功角变化分别为 $\delta_1$ 和 $\delta_2$ ,VSG<sub>1</sub>:VSG<sub>2</sub>容量比为 $C_1:C_2$ ,则根据文献[19]可知有功和无功功率为

$$P_i = \frac{E_i U}{Z_i} \sin \delta_i \quad (5)$$

$$Q_i = \frac{E_i U}{Z_i} (\cos \delta_i - U) \quad (6)$$

式中: $E_i$ 为VSG内电势, $i=1,2$ ; $U$ 为VSG机端电压。

为简化分析,这里假设 $E_1=E_2=E$ ,不考虑线路阻抗。因此,两台虚拟同步机输出阻抗 $Z_i=\omega L_i$ ,输出有功功率如下:

$$P_i = \frac{EU}{\omega L_i} \sin \delta_i \quad (7)$$

有功负载增加后,相较于无功功率在虚拟阻抗上引起的压降,有功功率引起的电压跌落可被忽略<sup>[18]</sup>,增加负载后的有功功率见下式:

$$P_i + \Delta P_i = \frac{EU}{\omega L_i} \sin(\delta_i + \Delta \delta_i) \quad (8)$$

式中: $\Delta P_i$ ( $i=1,2$ )和 $\Delta \delta_i$ ( $i=1,2$ )分别是两台虚拟同步机有功负载增量和功角增量。

通过图2、式(5)、式(7)和式(8),考虑到 $\delta$ 一般小于 $5^\circ$ ,可认为 $\sin \delta \approx \delta$ , $\cos \delta \approx 1$ ,因此,两台虚拟同步机的有功功率可以简化为

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= \frac{EU}{\omega L_i} \sin(\delta_i + \Delta \delta_i) - \frac{EU}{\omega L_i} \sin \delta_i \\ &= \frac{EU}{\omega L_i} \sin \Delta \delta_i \end{aligned} \quad (9)$$

考虑到系统加减载时功角的变化量通常比较小,因此有 $\sin \Delta \delta \approx \Delta \delta$ ,式(9)可简化为

$$\Delta P_i = \frac{EU}{\omega L_i} \Delta \delta_i \quad (10)$$

为了确保并联系统在负荷投切时具备良好的动态特性,两台VSG动态过程中须满足容量比,即

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \frac{C_1}{C_2} \quad (11)$$

假设在 $t_0$ 时刻增加有功负载,且交流母线频率受负载扰动变化至稳态的时间增量为 $\Delta t$ ,则两个VSG的功率角增量可以计算如下:

$$\Delta \delta_i = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} \Delta \omega_i dt \quad (12)$$

为简化分析,令两台VSG的有功参考值 $P_{ref}=0$ ,则综合式(10)~式(12)可得:

$$\frac{\Delta\omega_1(s)}{\Delta\omega_2(s)} = \frac{E_1 X_2 J_1 \omega_0 s + (D_1 \omega_0 + K_{\omega 1})}{E_2 X_1 J_2 \omega_0 s + (D_2 \omega_0 + K_{\omega 2})} = \frac{C_1}{C_2} \quad (13)$$

式中: $E_1, E_2$ 为VSG<sub>1</sub>和VSG<sub>2</sub>的内电势; $J_1, J_2$ 为VSG<sub>1</sub>和VSG<sub>2</sub>的虚拟惯量; $K_{\omega 1}, K_{\omega 2}$ 分别为VSG<sub>1</sub>和VSG<sub>2</sub>的调差系数; $X_1, X_2$ 分别为VSG<sub>1</sub>和VSG<sub>2</sub>的虚拟电抗。

两台VSG并联系统在满足式(12)的情况下,VSG并联系统在系统加减载时总具有良好的动态特性。

由上述分析可知,当两台VSG并联系统参数满足下式时,并联VSG系统在系统加减载时具备良好的动态特性,有助于提高并联系统的带载能力。

$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{J_1}{J_2} = \frac{D_1}{D_2} = \frac{K_{\omega 1}}{K_{\omega 2}} = \frac{C_1}{C_2} \quad (14)$$

根据式(6)和式(7),投入无功负载后,两台VSG输出的无功功率可表示为

$$Q_i = \frac{E(U - \frac{\omega L_i}{E} \Delta Q_i)}{\omega L_i} [\cos\delta - (U - \frac{\omega L_i}{E} \Delta Q_i)] \quad (15)$$

式中: $\Delta Q_i(i=1,2)$ 分别为两台VSG输出无功功率。

根据式(6)和式(15),无功功率变化量 $\Delta Q_i$ 可表示为

$$\Delta Q_i = (2U - \cos\delta - 1) \frac{E}{\omega L_i} \quad (16)$$

考虑到投切无功负载过程中VSG并联系统具备良好的动态特性,动态无功 $\Delta Q$ 须满足下式:

$$\frac{\Delta Q_1}{\Delta Q_2} = \frac{C_1}{C_2} \quad (17)$$

由式(16)、式(17)可知,在加减无功负载中,只需满足下式,动态无功功率具备良好的动态特性。

$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{C_1}{C_2} \quad (18)$$

综合式(14)和式(18)可知:不同容量VSG并联时,须满足的条件为:虚拟同步电抗须和容量比成反比;虚拟惯量、阻尼、调差系数须和容量比成正比关系。

### 3 仿真实验

为验证本文提出的参数设计方案的可行性,

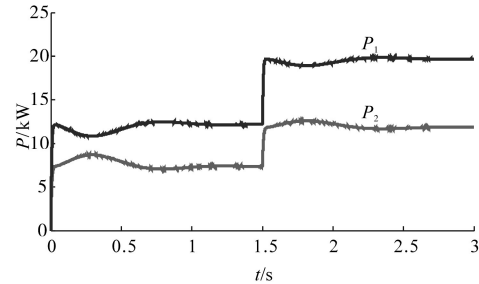
在Matlab/Simulink中构建了两台VSG并联仿真模型,容量比为5:3。整个仿真过程VSG带12 kW+8 kvar本地负载。仿真开始,VSG<sub>1</sub>和VSG<sub>2</sub>并联运行,1.5 s时投入阻感负载。仿真参数如表1所示。

表1 不同容量VSG并联参数

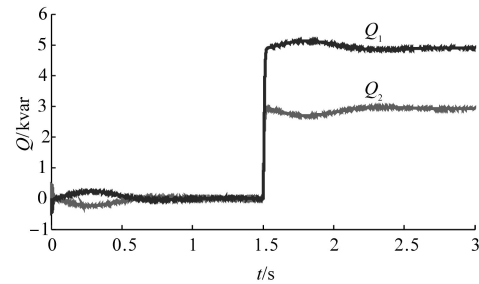
Tab.1 The parameters of VSG paralleling system with different capacity

VSG <sub>1</sub>	数值	VSG <sub>2</sub>	数值
$D_1$	20	$D_2$	12
$K_{\omega 1}$	500	$K_{\omega 2}$	300
$J_1$	5	$J_2$	3
$L_1/\text{mH}$	6	$L_2/\text{mH}$	10

首先,设置 $J_1=J_2=3$ ,其余参数取自表1,得到惯量不匹配时VSG并联系统输出有功和无功功率波形如图3所示。



(a)两台VSG输出有功功率



(b)两台VSG输出无功功率

图3 虚拟惯量不匹配时VSG并联系统输出有功和无功功率

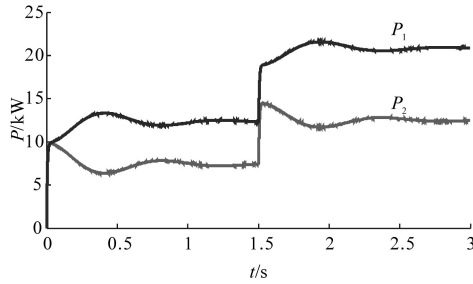
Fig.3 Active and reactive power of parallel system with mismatched virtual moment of inertia

由图3可知,当虚拟惯量不匹配时VSG并联系统有功和无功功率在加载过程中动态效果差,振荡超调明显,系统恢复至稳态的时间约为1.4 s,这极易导致系统动态不稳定,威胁微电网系统的安全稳定运行。

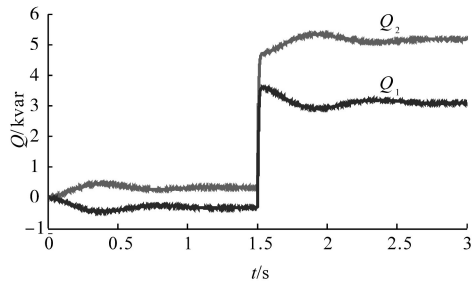
其次,设置 $L_1=L_2=6$  mH,其余参数取自表1,得到阻抗不匹配时VSG并联系统输出有功和无功功率波形如图4所示。由图4可知,当虚拟同步电抗不匹配时VSG并联系统有功和无功功率在加载过程中同样出现了动态效果差,振荡超调



的现象,系统恢复至稳态的时间约为 1.5 s,并且由于 VSG 并联系统的阻抗不匹配,出现了无功环流,无功功率不能做到按容量比分配。



(a)两台VSG输出有功功率

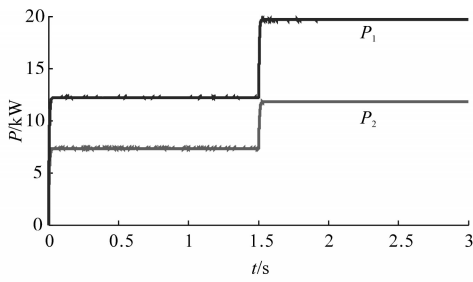


(b)两台VSG输出无功功率

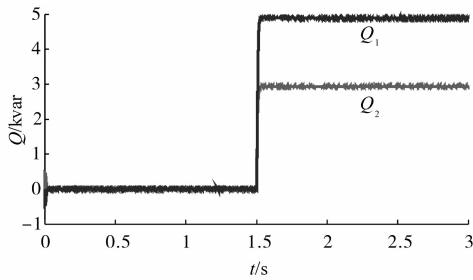
图4 虚拟同步电抗不匹配时VSG并联系统输出有功和无功功率

Fig.4 Active and reactive power of parallel system with mismatched virtual synchronous reactance

最后,两台 VSG 参数均取自表 1,VSG 并联系统输出有功和无功功率波形如图 5 所示。



(a)两台VSG输出有功功率



(b)两台VSG输出无功功率

图5 不同容量VSG并联仿真波形

Fig.5 VSG parallel simulation waveforms with different capacities

由图 5 可知,当 VSG<sub>1</sub> 和 VSG<sub>2</sub> 参数满足设计时,两台 VSG 能够按照 5:3 的容量比均分有功功

率和无功功率,在加载的过程中,有功和无功功率动态过程良好。

根据上述分析可知,采用本文所提出的参数设计方法时,VSG 并联系统在投入负载的动态过程中具备良好的动态特性,证明了本文所提方法的有效性。

#### 4 实验验证

搭建了两台 1 kW 的两电平逆变器实验平台,针对本文提出的参数设计方法进行实验验证,VSG 并联实验平台原理图如图 6 所示。实验平台参数为:滤波电感  $L_f=3.6$  mH,滤波电容  $C_f=4.7$   $\mu$ F(角形),直流母线电压  $U_{dc}=200$  V,交流侧电压  $U_N=80$  V,开关频率为 5 kHz,额定角频率  $\omega_0=314$  rad/s。

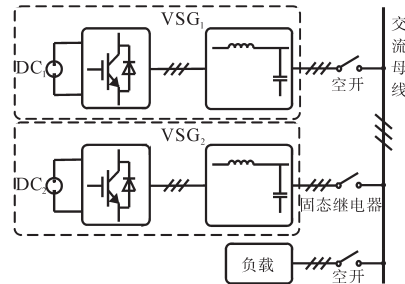


图6 VSG 并联实验平台原理图

Fig.6 Schematic diagram of VSG parallel experimental platform

实验平台参数如表 2 所示。

表2 不同容量 VSG 并联控制器平台参数

Tab.2 Parameters of experimental platform of VSG parallel controller with different capacity

VSG <sub>1</sub>	数值	VSG <sub>2</sub>	数值
$D_1$	5	$D_2$	3
$K_{\omega 1}$	50	$K_{\omega 2}$	30
$J_1$	2	$J_2$	1.2
$L_1/\text{mH}$	6	$L_2/\text{mH}$	10

为了验证本文所提出的参数设计方法的正确性,VSG<sub>1</sub> 和 VSG<sub>2</sub> 的主要控制器参数取自表 2。实验步骤:1)VSG<sub>1</sub> 启动建立电压带阻感负载运行,随后 VSG<sub>2</sub> 启动预同步,待同步完成后并入公共交流母线并同时关闭预同步,至此两台 VSG 并联带载运行;2)在上述负载的基础上投入阻感负载。

两台 VSG 输出负载电流  $i_a$  和交流母线电压  $U_{gab}$  实验波形如图 7 所示。图 7a 为 VSG<sub>2</sub> 投入交流母线的实验波形,可见,VSG<sub>2</sub> 投入后,并联系统具有良好的动态特性,经过约 500 ms 后,两台 VSG

均分功率;图7b、图7c依次为两台VSG加减负载时的实验波形,可见两台VSG输出电流波形动态特性良好;图7d为两台VSG并联带载稳态实验波形,可见,两台VSG能够按照5:3容量比分配电流。

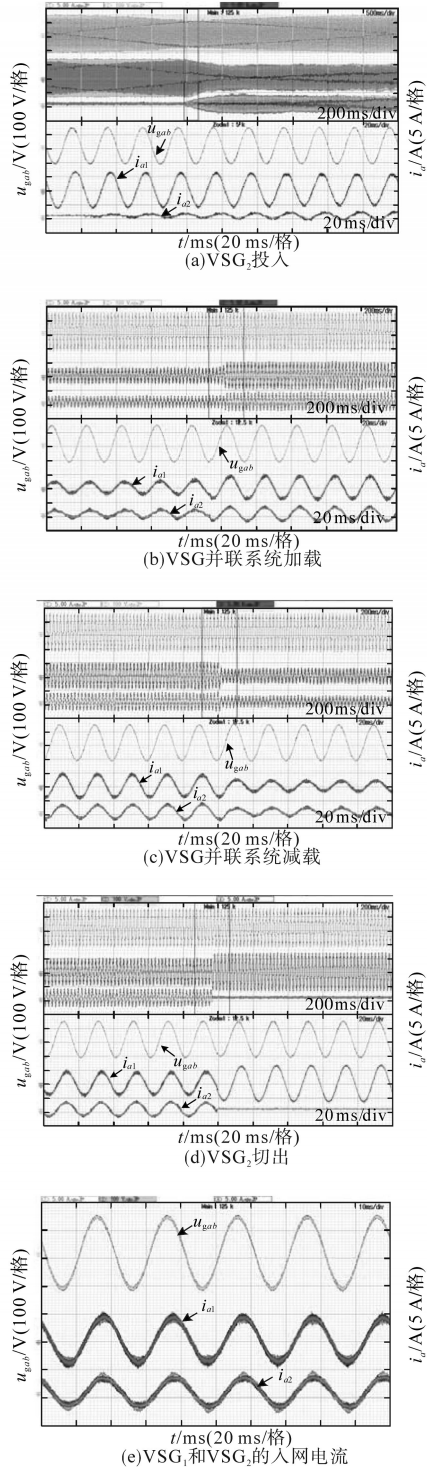


图7 参数匹配时不同容量VSG并联实验波形  
Fig.7 Parallel experimental waveforms of VSG with different capacities in parameter matching

为了进一步验证本文所提方法的有效

性,论文给出参数不满足表2时两台VSG输出负载电流和交流母线电压波形如图8所示。其中,参数 $D$ 和 $K_w$ 取自表2,  $J_1=J_2=2, L_1=L_2=6$  mH。

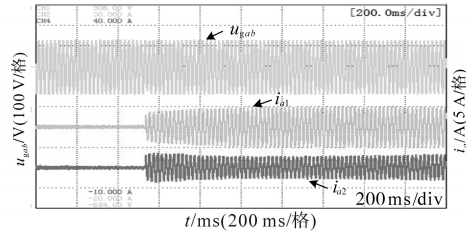


图8 参数不匹配时不同容量VSG并联实验波形  
Fig.8 Parallel experimental waveforms of VSG with different capacities in case of parameter mismatch

由图8可知,不满足本文所提出的参数组合时,VSG并联系统在投入阻感负载时,两台VSG输出电流动态过程较差,经过约600 ms的时间恢复至稳态运行,在动态过程中,电流没有按照5:3分配。

根据上述分析可知:当满足本文所提出参数组合时,并联系统具备良好的动态特性,有助于并联系统安全稳定运行。通过实验验证了本文所提方法的正确性。

### 5 结论

不同容量VSG并联,由于虚拟惯量和虚拟同步电抗的存在,VSG并联系统控制其参数的设计相比传统下垂控制要显得复杂一些,如果参数设计不合理,会导致并联系统加减载时产生较大的动态有功和无功环流,威胁并联系统稳定工作。因此,本文通过对不同容量VSG并联参数的详细推导,得出不同容量VSG并联时,须满足:虚拟同步电抗须和容量成反比,虚拟惯量,阻尼、调差系数须和容量成正比关系。通过仿真和实验验证了参数设计方法的正确性。

下一步研究计划如下:

- 1) VSG单机带非线性不平衡负载工况下的电压控制;
- 2) VSG并联系统带非线性不平衡负载工况下的电压控制;

### 参考文献

[1] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.  
[2] 马艺玮,杨苹,王月武,等. 微电网典型特征及关键技术[J]. 电力系统自动化,2015,39(8):168-175.  
[3] Zhong Qingchang, Nguyen PL, Ma Zhenyu, et al. Self-synchro-

