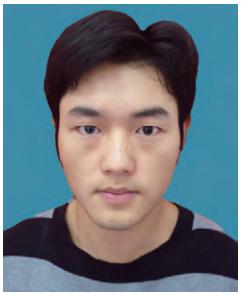
基于VSG模型的微电网逆变器技术研究

为确保微电网系统在离网状态下对重要负荷的持续供电，模拟发电系统中同步发电机的控制方案，对微电网逆变器的控制性能进行了研究与改进。采用虚拟同步调频系统，结合同步发电机转子运动方程模拟原动机的调速性能并增加自调频控制以满足系统在离网运行状态下由于负荷变动引起的对频率稳定性的要求；同时采用虚拟励磁系统解决了在多机并联运行的情况下，输出无功功率均分对等效输出阻抗的依赖，实现了准确的输出功率均分。通过Matlab/Simulink的仿真调试，验证了所采用方法的可行性。

王嘉磊[1] 何建平[1] 郭筱瑛[2] 李 清[1] 曹太强[1]/1.西华大学电气与电子信息学院 2.攀枝花学院电气信息工程学院



王嘉磊/硕士研究生

关键词/Keywords
微电网·
虚拟同步发电机·
下垂控制·
离网运行·

为解决高渗透率分布式发电系统带来的电网系统不稳定及其电能质量差等问题[1-3]，在21世纪初提出了微电网的控制概念并对此进行了分析与研究[4-6]，微电网将各分布式电源与负荷集中起来[7]，通常可为一个可控单元采用有功无功控制（*PQ*控制）进行并网运行，又能为自治系统利用电压频率控制（*VF*控制）独立运行。然而，由于实现离/并网运行的目标及其所采取控制方式的不同使控制电路结构显得异常复杂，同时在切换过程中有可能引起过电流现象，导致切换失败，损害电网质量。文献[8-9]提出的下垂控制的方法解决了不同运行模式下需要切换控制电路的问题，但是用电力电子装置作为电能传输接口不具有同步发电机系统的惯性特性，因此不能有效保证系统的稳定性。

针对微电网逆变器系统存在的上述问题，国内外学者提出了不同的控制策略。文献[10]在传统下垂控制的基础上提出了一种虚拟惯性的控制策略，但并未解决输出无功功率与等效输出阻抗间的相互制约问题；文献[11-12]提出同步逆变器的方法，模拟了同步发电机所具有的下垂特性及其惯性特征，但只对并网状态进行了分析。本文采用虚拟同步发电机（VSG）的方法，针对文献[12]中未作分析的离网运行模式及其多机并联运行模式进行了理论和仿真分析，并根据离网运行模式下存在的频率跌落问题改进了调频系统的控制方案，加强了系统的稳定性；同时分析并解除了输出无功功率与等效输出阻抗的制约关系，有效实现了多机并联运行情况下输出有功功率与无功功率的均分。

虚拟调频系统

为了模拟同步发电机的下垂特性，目前常采用的一种有功功率－频率（$P-f$）下垂控制策略，如图1所示。

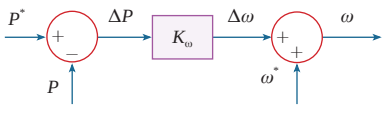


图1 $P-f$ 下垂控制策略

图1中，P^*、P、ω^*和ω分别为参考有功功率、逆变器输出的有功功率、参考角频率和其逆变器输出的电源频率；K_ω

西华大学研究生创新基金研究项目（同步并网逆变器的研究），四川省科技厅应用基础研究项目（2012JY0120），四川省科技厅支撑项目（2013GZ0130），四川省教育厅重点项目（11ZA003），四川省高校重点实验室－太阳能技术集成及应用推广，攀枝花市太阳能光伏离/并网智能化控制逆变一体集成应用（2014CY－S－1－2），分布式光伏多逆变器并网控制研究（2014YB11），西华大学重点科研基金资助项目（Z1120940）。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为有功功率－频率下垂控制模块的下垂系数。

通过下垂控制计算实际角频率为

$$\omega=\omega^*+K_\omega(P^*-P) \tag{1}$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta P}=\frac{\omega-\omega^*}{P-P^*}=-K_\omega \tag{2}$$

大电网中由于含有大容量的同步发电机，发电系统具有惯性大、频率稳定的特点，为了更好地模拟同步发电机的整体性能保证系统频率的稳定性，为此引入了虚拟惯性的控制策略。

根据同步发电机的转子运动方程，可以得到

$$\begin{aligned}Js\Delta\omega&=T_m-T_e-D(\omega-\omega^*)\\T_m&=P_m/\omega^*\\T_e&=P_e/\omega^*\end{aligned} \tag{3}$$

式中，J为惯性时间常数；s为微分算子；T_m为机械转矩；T_e为电磁转矩；D为阻尼系数；P_m为机械功率；P_e为电磁功率，取极对数为1。

系统处于稳态时，原动机输入的机械转矩与发电机输出的电磁转矩基本相等（不计摩擦损耗），此时转速为定值。当负荷增重，转速降低，此时应增大输入机械功率转矩以保持转速稳定在其额定值附近；反之则应减小输入机械功率。

结合同步发电机的转子运动方程，为使逆变器在满足下垂特性的同时具有虚拟惯性这一特点，调频控制系统做了如图2所示的改进。虚线下侧为虚拟惯性控制模块，利用同步发电机的转子运动方程，同时加入了ω^*前馈量，改善起动特性；虚线上侧为自调频控制器，根据系统频率的偏差动态调整给定功率以满足系统的稳定性要求。

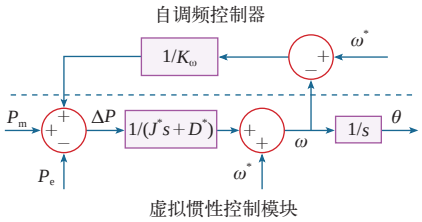


图2　改进的VSG调频系统控制图

图2中，$D^*=\omega^*D$为阻尼分量；$J^*=\omega^*J$为惯性分量；K_ω为自调频系数。

$P-\omega$特性由自调频控制器和虚拟惯性控制模块共同决定，即

$$\omega=\omega^*+\frac{K_\omega(P_m-P_e)}{K_\omega(J^*s+D^*)+1} \tag{4}$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta P}=\frac{\omega-\omega^*}{P_e-P_m}=\frac{-\alpha}{J's+1} \tag{5}$$

式中，$\alpha=K_\omega/(D^*+1/K_\omega)$为微电网电源的静态调差系数，表示微电网电源负荷变动时频率的偏差程度；惯性时间常数$J'=\alpha J^*$，表示微电网电源负荷变动时频率的动态响应时间。

由式（5）可知，该传递函数具有惯性特性，改进后的调频系统性能由J^*、K_ω和D^*共同决定。对比式（2），单由下垂控制实现的频率变化具有阶跃瞬变性，微电网逆变器加入虚拟惯性及其自调频控制的概念后，所提出的调频方法使系统输出频率对功率波动和电网频率波动均呈现低通滤波特性，可以减缓外部扰动对输出频率的影响；同时图2中虚线上侧所增加的$(\omega^*-\omega)/K_\omega$项作为自调频控制在电网频率波动时提供变化的动态功率补偿，有效减少了频率跌落率，增强了系统稳定性。

虚拟励磁系统

1. 下垂控制功率分析

为有效提高微电网系统的整体容量及其可靠性，通常需要多分布式电源并联稳定运行。以两台并联微源为例分析多机并联运行的功率分配机理，通过对励磁系统的改进解除功率分配与输出阻抗之间的制约关系。

两台并联运行的分布式电源简化系统如图3所示，将微源逆变器等效成一个有内阻的电压源。图3中，U_1、U_2和U_o分别为微源逆变器1的输出电压、微源逆变器2的输出电压和交流并联母线电压，微源逆变器1和微源逆变器2的输出阻抗和连线阻抗之和等效表示为$Z_n\angle\theta_{Zn}=R_n+jX_n(n=1,2)$。其中，$\theta_1$、$\theta_2$分别为微源逆变器1和微源逆变器2的输出电压相位；$\theta_{Z1}$、$\theta_{Z2}$为等效输出阻抗的相位。

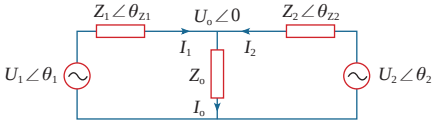


图3　两微源逆变器并联等效电路图

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

微源逆变器的输出功率可由下式表示

$$\begin{cases} P_n = [(U_n U_o \cos\theta_n - U_n^2)\cos\theta_{Zn} + \\ \quad U_n U_o \sin\theta_n \sin\theta_{Zn}]/Z_n \\ Q_n = [(U_n U_o \cos\theta_n - U_n^2)\sin\theta_{Zn} - \\ \quad U_n U_o \sin\theta_n \cos\theta_{Zn}]/Z_n \end{cases} \quad n = 1,2 \tag{6}$$

在微电网发电系统中，假设等效输电线路电阻较小，线路阻抗呈感性，即$X \gg R$，此时$Z_n \approx X_n$，$\theta_{Zn} \approx 90°$；由于逆变接口式微源的等效输出阻抗相比于负载阻抗非常小，因此逆变接口式微源输出电压与系统母线电压U_o之间的相角差会很小，当相角采用弧度表示时就近似有$\sin\theta_n \approx \theta_n$，$\cos\theta_n \approx 1$，因此式（6）可简化为

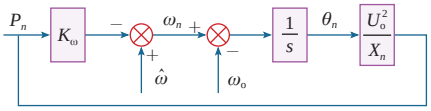
$$\begin{cases} P_n \approx U_n U_o \sin\theta_n / X_n \approx U_o^2 \theta_n / X_n \\ Q_n \approx (U_n U_o \cos\theta_n - U_n^2)/X_n \approx U_o(U_o - U_n)/X_n \end{cases} \tag{7}$$

下垂控制方程为

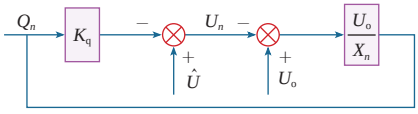
$$\begin{cases} \omega = \hat{\omega} - K_\omega P_n \\ U = \hat{U} - K_q Q_n \end{cases} \tag{8}$$

式中，$\hat{\omega}$为空载角频率（即参考角频率ω^*）；$\hat{U}$为空载输出电压（即额定电压幅值U_{ref}）；K_ω、K_q分别为其下垂系数。

可以得到如图4所示的$P-f$、$Q-V$控制框图，其中ω_o为公共母线角频率。



（a）有功功率/频率控制环（$P-f$）



（b）无功功率/电压控制环（$Q-V$）

图4　输出功率等效控制环

由输出功率等效控制环路得到其有功功率、无功功率方程为

$$\begin{cases} P_n(s) = [\hat{\omega}(s) - \omega_o(s)] \dfrac{\dfrac{U_o^2}{sX_n}}{1 + \dfrac{K_\omega U_o^2}{sX_n}} \\ Q_n(s) = (U_o - \hat{U}) \dfrac{\dfrac{U_o}{X_n}}{1 + \dfrac{K_q U_o}{X_n}} \end{cases} \tag{9}$$

通过分析式（9）可得，有功功率控制环路中因为积分项的存在，各并联运行的逆变器输出有功功率在等效输出阻抗不同的情况下能实现准确的功率分配；然而无功功率控制环路中因为没有积分项的存在，稳态时无功功率输出传递函数在整个频带范围内的增益都包括X_n，输出无功功率随等效输出阻抗的变化而变化[13]，因此需要寻求新的控制方法解除输出无功功率对等效输出阻抗的依赖，实现准确的功率分配。

2. 励磁系统设计

由以上分析可知，为了实现准确的无功功率分配需仿造有功功率输出的设计理念，即合理地添设积分项，使稳态时逆变器输出的无功功率与等效阻抗X_n解耦。

采用同步发电机二阶机电暂态方程建模，因为LC滤波及其虚拟输出阻抗的等效可以假设其线路阻抗呈感性进行分析，可得基于虚拟同步发电机模型的微源逆变器的感应电动势e、输出有功功率P_e和输出无功功率Q的表达式，即

$$\begin{cases} e = \omega_n M_f i_f \sin\theta - M_f \dfrac{\mathrm{d}i_f}{\mathrm{d}t}\cos\theta \\ P_e = \omega_n M_f i_f < i, \sin\theta \geqslant \omega_n M_f i_f \theta (U_n - U_o)/X_n \\ Q = -\omega_n M_f i_f < i, \cos\theta \geqslant -\omega_n M_f i_f (U_n - U_o)/X_n \end{cases} \tag{10}$$

当励磁电流恒定时，励磁感应电动势可写成

$$e = \omega_n M_f i_f \sin\theta \tag{11}$$

式中，电角速度$\omega_n = \mathrm{d}\theta/\mathrm{d}t$；$M_f$为励磁绕组与定子绕组间的互感，随电角度$\theta$变化；$i_f$为励磁电流。

模拟同步发电机的无功调节方式，电压下垂系数定义为所需求无功功率的变化量ΔQ与电压变化量ΔU的比值，即

$$D_q = \frac{1}{K_q} = -\frac{\Delta Q_n}{\Delta U_n} \tag{12}$$

式中，Q_n为输出的无功功率；U_n为输出端的电压幅值。

额定电压的幅值U_{ref}（即空载运行电压$\hat{U}$）与端电压U_n的差值经D_q环节后叠加到无功功率参考值Q_{ref}与测量值的差值上，送到增益为$1/K$的积分器中，产生磁场信号$M_f i_f$。通过模拟同步发电机的励磁控制性能，其改进后的无功功率/电压控制框图

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

如图5所示。

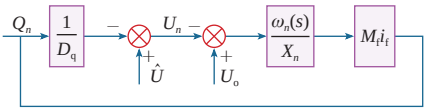


图5　采用VSG的无功功率／电压控制框图

图5中，励磁信号$M_f i_f = D_q(U_n - \hat{U})/Ks$，$K \approx \tau_v \omega^* D_q$，$\tau_v$为电压幅值调节时间常数。其无功功率控制的传递函数为

$$\frac{Q_n(s)}{(U_o - \hat{U})} = \frac{\dfrac{D_q \omega_n(s)(U_n - \hat{U})}{KX_n s}}{1 + \dfrac{\omega_n(s)(U_n - \hat{U})}{KX_n s}} \tag{13}$$

式（13）中，无功功率控制部分因为构造了如式（9）有功控制部分的积分项，因此能消除等效连接阻抗对输出无功功率的影响，从而使得并联运行系统输出功率的准确分配得以实现。

基于对虚拟同步发电机调频系统及其励磁系统控制性能的模拟，得到了如图6所示的虚拟同步发电机控制框图，其中虚线框内为励磁部分控制图。

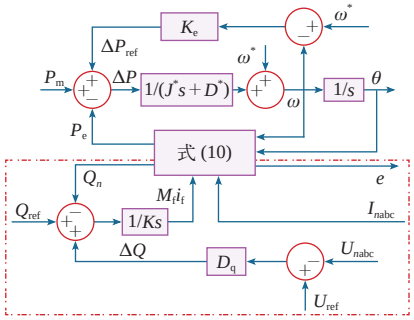


图6　虚拟同步发电机（VSG）控制框图

图6中，U_{nabc}为逆变器输出端电压，与感应电动势e对应；I_{nabc}为电感输出电流，与定子端电流i对应；输出滤波器阻抗与励磁绕组的阻感对应。

仿真验证

1. 单机运行性能验证

为验证所采用控制策略的合理性，在Matlab/Simulink中进行仿真调试。单机运行时，具体参数设置如下。

VSG的额定频率为50 Hz，相电压幅值U_{ref}为311 V，$\omega^* = 100\pi$，设定参考有功功率为4.35 kW，参考无功功率Q_{ref}为2 kW，电路采用LC滤波并采用无源阻尼的方法衰减谐振尖峰，滤波电感为20 mH，与电感串联的阻尼为0.5 Ω，滤波电容为200 μF，与之并联的阻尼为2 000 Ω，系统呈星形连接。对于控制电路，惯性分量J^*为100，阻尼分量D^*为4 000，下垂系数K_ω为3 000，τ_v取0.02，即D_q为160.70。

初始时刻负载接阻性负载，所需有功功率为3.5 kW，0.5 s负载降低了500 W，虚拟同步发电机单机运行时，其输出特性如下。

图7、图8反映了VSG在离网模式下输出电压对有功功率的变化所具有的稳定性；当负载需求减小时，VSG输出功率降低，三相输出电压保持稳定，三相输出电流明显降低，如图9所示；图10、图11分别为三相输出电压及其电流的频谱图，具有较小的谐波畸变；图12体现了同步发电

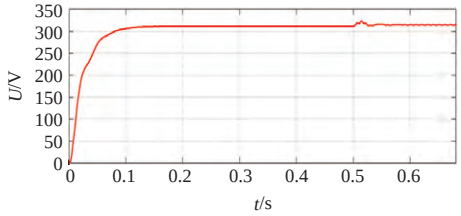


图7　VSG输出电压幅值波形

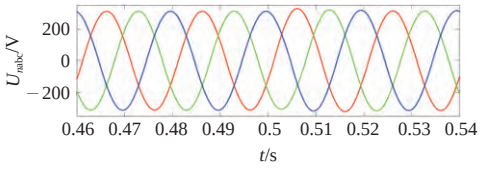


图8　VSG输出三相电压U_{nabc}

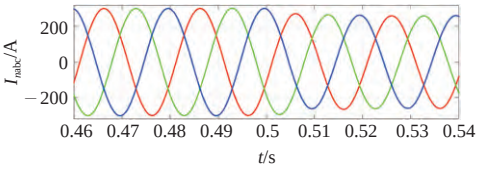


图9　VSG输出三相电流I_{nabc}

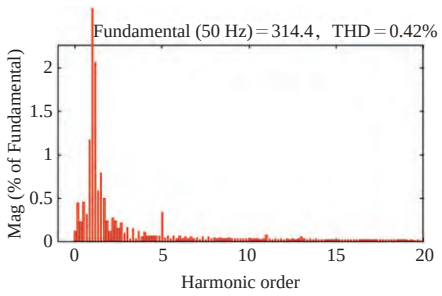


图10　VSG a相输出电压频谱图

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

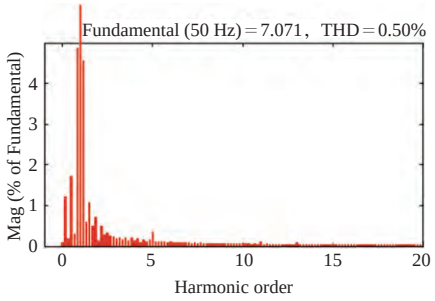


图11 VSG a相输出电流频谱图

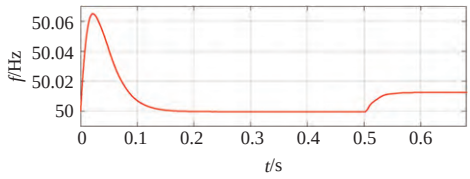


图12 VSG瞬时频率

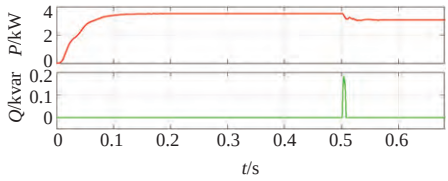


图13 VSG输出功率

机的有功－频率（$P-f$）下垂特性；图13表明了VSG根据负载需求具有良好的功率输出特性。

通过图14、图15系统输出频率的动态性能对比分析可知，采用自调频控制的改进VSG在起动及其负载变化的瞬间具有频率波动范围小、变化平滑的特点，有效增强了系统输出频率的稳定性，在负荷波动等情况下，能够保证系统在离网

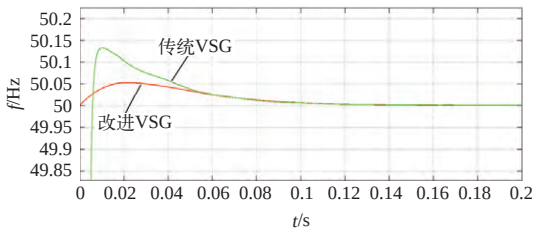


图14 改进VSG与传统VSG开起瞬间频率动态性能对比

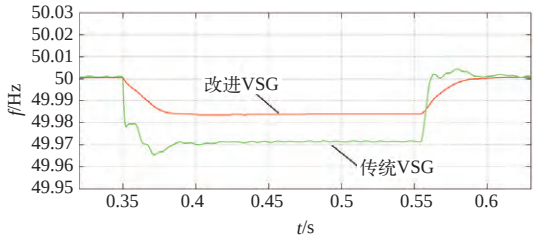


图15 改进VSG与传统VSG负载变化时频率动态性能对比

模式下的可靠、稳定运行。

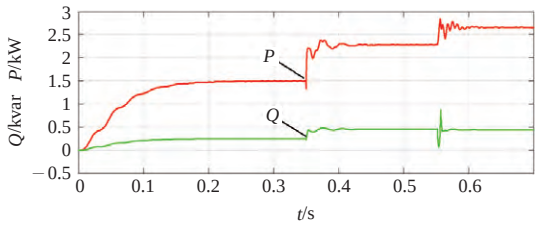
2. 并联运行性能验证

为验证所采用虚拟励磁系统对输出无功功率均分与等效输出阻抗之间的解耦作用，作如下两个仿真分析。

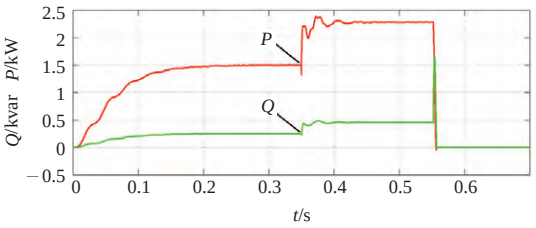
（1）仿真一：等效输出阻抗相同

假设两台微源逆变器（VSG_1与VSG_2）并联运行，参数容量相同，线路连接阻抗$Z_n=0.5+j6.28\ \Omega$ ($n=1,2$)，与单机运行时一致。采用所提出的改进VSG控制方法，两台微源逆变器刚开始时并联运行，负荷为3 kW的有功功率，0.5 kvar的无功功率；0.35 s时突增2 kW的有功功率，0.5 kvar的无功功率；0.55 s时去除增加负荷，同时VSG_2退出并联系统，由VSG_1单独运行。

通过图16可以看出，当等效输出阻抗相同时，微源逆变器在负载功率变化的各个阶段都能够很好地实现负载功率均分，即均分输出功率。



（a）VSG_1输出功率



（b）VSG_2输出功率

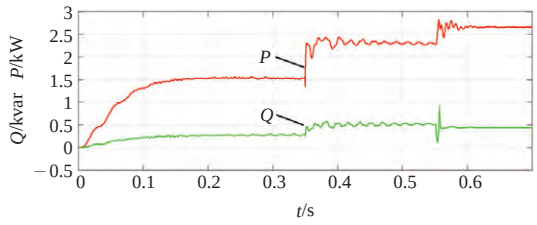
图16 等效输出阻抗相同时两VSG功率输出情况

（2）仿真二：等效输出阻抗不同

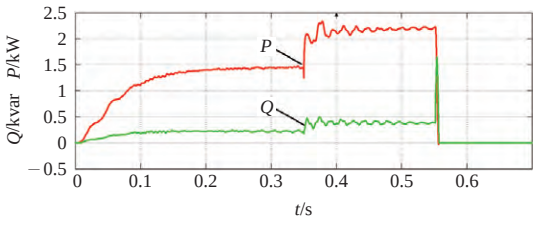
两微源逆变器的线路连接阻抗分别为$Z_1=0.5+j6.28\ \Omega$，$Z_2=0.25+j9.42\ \Omega$，即等效输出阻抗不同，其余各仿真参数及仿真步骤均与仿真一相同。

通过图17可以看出，在两微源逆变器等效输出阻抗不同的情况下，采用虚拟励磁系统的方法依然能够有效实现负载功率的均分，解除了输出

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



（a）VSG$_1$输出功率



（b）VSG$_2$输出功率

图17　等效输出阻抗不同时两VSG功率输出情况

无功功率均分与等效输出阻抗间的耦合关系。

结束语

基于虚拟同步发电机的控制方法，模拟同步发电机的下垂及其惯性特性，主要通过了以下两个方面的改进优化了VSG在离网及其多机并联运行下的控制性能。

1）增加自调频控制有效减小了负载在动态变化情况下的输出频率波动范围，增强了系统的稳定性。

2）针对多机并联运行系统，分析和改进了传统的下垂控制方法，通过对虚拟励磁系统的构建消除了输出无功功率均分对等效输出阻抗的依赖，实现了多机并联运行情况下的准确功率均分。

通过Matlab/Simulink的仿真对比分析，验证了所采用方法的可行性，优化了VSG在离网及其多机并联运行情况下的整体控制性能。

参考文献

[1] Beck H P，Hesse R．Virtual synchronous machine [C]．9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation，IEEE，2007：1-6．

[2] Chen Y，Hesse R，Turschner D，et al．Improving the grid power quality using virtual synchronous machines [C]．2011 international conference on Power Engineering，Energy and Electrical Drives，IEEE，2011：1-6．

[3] Chen Y，Hesse R，Turschner D，et al．Comparison of methods for implementing virtual synchronous machine on inverters [C]//Proceeding of International Conference on Renewable Energies Power Quality．ICREPQ，Santiago de Compostela，Spain，2012：1-6．

[4] 王成山，肖朝霞，王守相．微网综合控制与分析 [J]．电力系统自动化，2008，32 (7)：98-103．

[5] 王成山，李鹏．分布式发电，微网与智能配电网的发展与挑战 [J]．电力系统自动化，2010，34 (2)：10-14．

[6] 撖奥洋，邓星，文明浩，等．高渗透率下大电网应对微网接入的策略 [J]．电力系统自动化，2010，34 (1)：78-83．

[7] 丁明，杨向真，苏建徽．基于虚拟同步发电机思想的微电网逆变电源控制策略 [J]．电力系统自动化，2009，33 (8)：89-93．

[8] 阚志忠，张纯江，薛海芬，等．微网中三相逆变器无互连线并联新型下垂控制策略 [J]．中国电机工程学报，2012，31 (33)：68-74．

[9] 张纯江，王晓寰，薛海芬，等．微网中三相逆变器类功率下垂控制和并联系统小信号建模与分析 [J]．电工技术学报，2012，27 (1)：32-39．

[10] 杜威，姜齐荣，陈蛟瑞．微电网电源的虚拟惯性频率控制策略 [J]．电力系统自动化，2012，35 (23)：26-31．

[11] Zhong Q C，Weiss G．Static synchronous generators for distributed generation and renewable energy [C]．Power Systems Conference and Exposition，2009：1-6．

[12] Zhong Q C，Weiss G．Synchronverters：inverters that mimic synchronous generators [J]．IEEE Transactions on Industrial Electronics，2011，58 (4)：1259-1267．

[13] 吕志鹏，罗安，蒋雯倩，等．多逆变器环境微网环流控制新方法 [J]．电工技术学报，2012，27 (1)：40-47．

（收稿日期：2015－02－04）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net