基于自适应旋转惯量的虚拟同步发电机控制策略

程启明¹,余德清¹,程尹曼²,高 杰¹,张 宇¹,谭冯忍¹ (1. 上海电力学院 自动化工程学院,上海 200090;2. 上海电力公司 市北供电分公司,上海 200041)

摘要:针对虚拟同步发电机(VSG)中存在暂态过程长、电能质量差的缺点,提出了一种基于自适应旋转惯量的 VSG 控制策略。首先,介绍了传统 VSG 控制存在的问题;然后,在传统 VSG 控制基础上提出了新型的 VSG 控制策略,并分析了这种新型 VSG 并网有功和无功的调节方案。所提 VSG 控制策略能够根据负载扰动 引起的频率变化量实时动态调节旋转惯量,避免了频率迅速上升和跌落,从而改善了频率响应特性。最后, MATLAB/Simulink 软件仿真和硬件实验的结果验证了所提 VSG 控制方法的有效性和可行性。相比于传统 VSG 方法,所提 VSG 控制方法的稳定性更好、响应速度更快、超调更小、谐波更低。

关键词:微电网;旋转惯量;虚拟同步发电机;逆变器;自适应控制

中图分类号:TM 31 文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.12.012

0 引言

能源与环境问题的加剧,使得分布式发电 DG (Distributed Generation)和微电网技术得到了广泛关注^[1-3]。DG 主要采用电力电子逆变器,与大电网同步发电机相比在外部有较大差异,其容量更小,输出阻抗更低,缺少系统惯性,且无法为含有 DG 的主动配电网提供一定质量的电压和频率支持^[4-6]。

下垂控制是微电网中最常用的 DG 控制方法。 它通过跟踪电压幅度和频率的参考信号,由逆变器 调节下垂控制器的输出电压和频率,并合理分配有 功和无功功率^[7-9]。然而,在实施过程中下垂控制缺 乏旋转惯性,使其难以提供必要的阻尼和频率支持。 为了解决上述问题,虚拟同步发电机 VSG(Virtual Synchronous Generator)可以模拟同步发电机的频率 和电压的调节原理,以提高系统的稳定性。VSG 结 合了同步发电机和逆变器的特点,它非常适合用于 微电网,且已被广泛接受^[10-11]。

目前 VSG 控制算法的研究受到广大学者的认可,但实际应用中仍然存在一些问题。在实现 VSG 时,它与下垂控制类似,使用有功和无功功率解耦控制,即有功功率-频率(P-f)和无功功率-电压(Q-V)下垂控制方法^[12-13]。在此基础上,不少学者围绕 VSG 控制方法的准确性、稳定性和经济性等问题提

收稿日期:2017-09-03;修回日期:2018-08-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61573239);上海市 重点科技攻关计划项目(14110500700);上海市自然科学基 金资助项目(15ZR1418600);上海市电站自动化技术重点实 验室项目(13DZ2273800)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (61573239), the Key Science and Technology Plan of Shanghai Science and Technology Commission (14110500700), the Natural Science Foundation of Shanghai (15ZR1418600) and the Project of Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology (13DZ2273800)

出改进的控制方法。例如:文献[14]设计了级联的 频率、相角和直流电压环控制策略,可以支持 VSG 在故障时为电网提供频率支撑,实现频率快速恢复, 但没有考虑电压的影响;文献[15]在无功控制线路 上引入了微分项, 使 VSG 具有功率分配性能和环流 抑制能力,但没有考虑微分带来的技术问题;文献 [16]提出了一种虚拟电抗控制策略,通过减去虚拟 的电压降,使得系统的阻抗得到改善,电抗和电阻的 比值可以在一定程度上降低,但会使孤岛模式的输 出电压下降;文献[17]将 VSG 的有功功率传输方程 线性化,并引入线性控制理论,将阻尼因子与转角偏 差解耦,以实现有功功率振荡抑制并保证频率稳定, 但没有考虑电压的稳定性;文献[18]提出一种基于 乒乓控制的转动惯量可调的 VSG 控制策略,可实现 转动惯量对频率的动态实时跟踪,但其过程实现比 较困难;文献[19]提出通过指令修正的方法以实现 VSG 输出电压恒定不变的控制目标,但该控制算法 过程较长;文献[20]提出一种支持向量机 SVM (Support Vector Machine)的转动惯量和阻尼系数自 适应控制,在保证储能装置性能最好的同时,优化频 率响应曲线,但该文将逆变器等效为电流源。

本文建立并研究了 VSG 控制的数学模型,并分 析了完整的 VSG 有功、无功调节控制器。针对 VSG 中存在暂态过程长、电能质量差的缺点,提出了一种 基于自适应旋转惯量的 VSG 技术。MATLAB/Simulink 软件仿真和硬件实验的结果都验证了所提 VSG 控 制策略的正确性与有效性。

1 传统 VSG 控制存在的问题

为了使 DG 系统具备同步发电机的特点,避免 引入过多的同步发电机的瞬态变量,避免复杂的电 磁耦合关系,本文采用同步发电机的经典二阶模型 建立数学模型。其表达式为:

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_{\rm m} - P_{\rm e}}{\omega} - D(\omega - \omega_0) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases}$$
(1)

其中,J为同步电机的转动惯量;D为阻尼系数; ω_0 为电网同步角速度; P_m 、 P_e 分别为机械功率、电磁功率; ω 、 θ 分别为 VSG 的角速度(即 VSG 的机械角速度)和虚拟功角。

图 1 为基于 VSG 的逆变器控制系统结构框图。 图中, L_f 为滤波电感; C_f 为滤波电容;Z 为负载阻抗; Z_{line} 为输电线路的阻抗; P_e 、Q 为计算功率;P、E 分别 为过程有功功率、电压; E_0 、 Q_{ref} 分别为额定电压、额 定无功功率。系统主电路采用三相电压源逆变器, 通过对逆变器输出接口采样获得输出功率、电压和 电流。通过外环电源的作用,产生参考电压作为电 流双闭环的控制信号电压。电压环路控制器采用比 例积分(PI)控制以保证更好的电压跟踪。电流环 采用比例(P)控制环,以电容电流作为受控变量。



图 1 中的 VSG 算法包括虚拟调速器(频率控制器)、虚拟励磁控制器和 VSG 模型 3 个部分,分别模拟了同步发电机的调速器、励磁控制系统和同步发电机的机械特性与电气特性,通过 3 个控制部分的共同作用,达到模拟同步发电机运行特性的目的。 其中 VSG 算法为该控制策略的核心,而虚拟原动机调节模块模拟了同步发电机的一次调频特性。

图 2 为 VSG 的频率控制器内部结构框图。它



图 2 VSG 有功功率-频率控制框图 Fig.2 Diagram of VSG P-f control

包括转子运动特性环节、下垂控制环节2个部分,可 以输出参考电压的相位信息,使逆变器具有调频能 力,从而模拟同步发电机的调速特性。

图 2 中有功功率-频率下垂控制的表达式为:

$$P = P_{\rm ref} + (\omega_0 - \omega) K_{\rm f} \tag{2}$$

其中,K_r为有功功率下垂系数;P_{ref}为有功功率的参考值。下垂系数的计算公式为:

$$K_{\rm f} = \frac{\omega - \omega_{\rm min}}{P_{\rm max} - P} \tag{3}$$

其中, P_{max} 为分布式电源在频率下降时允许输出的最大有功功率; ω_{min} 为微电源最大输出有功功率对应的最小频率。

当并网运行时,频率设定值与系统频率一致,下 垂控制环节将失效,频率控制主要体现为转子运动 特性。而当孤岛运行时,大电网不再为电网提供频 率支撑,微电网频率通常会有一定的波动,此时下垂 控制环节作用产生一个附加功率以减小频率波动。

图 3 为励磁控制器内部结构框图。图中, K_q 为电压下垂控制系数; K_v 为电压调节系数; $E_m \ E_{ref}$ 分别为并网逆变器极端电压的真实值与指令值。励磁控制器内部结构等效于下垂控制算法中的无功功率控制回路。



图 3 VSG 无功功率-电压控制框图 Fig.3 Diagram of VSG Q-V control
图 3 中无功功率-电压控制的表达式为:

 $E = E_0 + (Q_{\rm ref} - Q)K_{\rm q} + (E_{\rm ref} - E_{\rm m})K_{\rm v}$ (4)

激励控制器获得参考电压幅值信息。通过用信号合成振幅,可以产生指令电压作为电压环路的输入。在 VSG 控制模型虚拟励磁系统中,虚拟电动势 E 不仅受到无功功率调节的影响,还受到逆变器机端电压控制信号 ΔE 的影响。

逆变器机端电压控制信号 ΔE 可以等效为同步 发电机的自动电压调节器 AVR (Automatic Voltage Regulator),具体表示为:

$$\Delta E = (E_{\rm ref} - E_{\rm m}) K_{\rm v} \tag{5}$$

2 基于旋转惯量的 VSG 自适应控制原理

VSG 是在传统下垂控制的基础上加入了转子运 行方程来模拟同步发电机的转子惯性与阻尼特性, 相较于下垂控制,其最大的特点就是转子惯性。当 进入孤岛运行模式时微电网的频率需由自身控制, 此时的微电网是个独立的小系统,如果其惯性很小, 那么轻微的功率波动就会引起系统显著的频率偏 移,甚至可能导致整个系统的崩溃。旋转惯量 J 是 转子惯量的代表性参数,与微电网的运行要求及微 电源和储能装置的动态特性密切相关。但与同步发 电机不同的是,VSG 的 J 并非实际存在,不受硬件条 件限制,取值相对灵活。

微电网在运行过程中常伴有负荷的扰动,J的 取值不同,在频率动态调节过程中逆变电源将表现 出不同的惯性。J的取值越小,微电网系统的惯性 就越小,此时微小的负荷波动就可能引起频率的快 速变化;J的取值越大,对微电网系统的频率支持作 用越明显,当然,这也意味着系统的动态响应越慢, 即频率到达稳定状态的时间更长。

为使 VSG 在给定功率变化时有更快的响应速度,结合虚拟转子惯量与功率振荡的关系,本文将频率的偏移量记为:

$$\Delta f = |f - 50| \tag{6}$$

将其作为变化量,可写出旋转惯量 J 的自适应 函数式为:

$$J = \begin{cases} J_0 & \Delta f < k \\ J_0 + k_f \frac{\omega_g}{s + \omega_g} \Delta f & \Delta f \ge k, \frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} < 0 \\ J_0 & \Delta f \ge k, \frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} > 0 \end{cases}$$
(7)

其中, J_0 为 VSG 投入稳定运行的初始转动惯量; ω_g 为低通滤波器参数;k 为频率变化量的限定数值,它的取值根据微电网质量要求的频率波动范围与实际运行情况决定; k_f 为频率跟踪系数,它决定频率误差反馈作用的强弱,即旋转惯量 J 跟随频率偏差变化的能力。 k_f 的选取原则为:①当 k_f 选取较大值时,能够根据虚拟转子频率变化率 df/dt 有效地改变旋转惯量 J 的大小,有助于减小暂态过程的超调量,但若 k_f 取值过大,则J 的值也较大,可能出现与直流侧储能装置动态特性不匹配的问题;②当 k_f 的值选取

得过小时,旋转惯量 J 对频率变化做出响应的能力 不足,减缓频率变化的效果不佳。因此,在选取 k_r 时,要综合考虑系统对于暂态响应超调和整体阻尼 的要求。在实际工程中,k_r的取值还要考虑直流侧 储能装置和微电网响应特性等方面的要求。

由式(7)可知,J的自适应取值步骤为:首先判断频率的偏移量与设定数值k之间的关系,若 $\Delta f < k$, 此时旋转惯量数值采用 J_0 ;若 $\Delta f > k$,此时需要判定 df/dt 的符号,当 df/dt<0 时采用引入了滤波器参数 的旋转惯量,当 df/dt>0 时采用 J_0 作为旋转惯量。

本文提出的这种新型的自适应旋转惯量方法具 有以下的特点:

a. 当微电网稳定运行,系统中没有大的扰动时, 采用传统的旋转惯量数值,VSG 运行满足功率的 要求:

b. 当系统中有较大负荷,微电源的投入或者切除时,系统的频率偏移大于设定数值,为了减少系统的频率变化带来的问题,采用新型的旋转惯量的方法;

c. 新的旋转惯量中引入了低通滤波器单元,能 消除线路中的不确定因素,这种控制方法的优点是 可以在负荷变化情况下保持系统频率稳定;

d. 在新型 VSG 控制方法启动一定时间之后,系 统趋于稳定,频率开始恢复到稳定数值,这时候频率 的变化率可能发生反向变化,此时采用传统的 VSG 控制方法可以有效快速地使频率恢复到额定数值。

3 新型 VSG 控制器结构

根据前文所述,可以建立逆变器的新型 VSG 控制器的结构框图,如图 4 所示。图中, U_{nref} 和 U_{abc} 分别为定子端电压和负载电压; I_L 和 I_o 分别为电感电流和负荷电流; K_{PWM} 表示逆变器的等效模型。电压外环采用 PI 控制器稳定负载电压,电流内环采用 P 控制器提高响应速度,其中 K_{av} 、 K_{ai} 分别为电压环 PI





控制的比例系数、积分系数, K_{ip}为电流环比例系数。 新型 VSG 控制器包含有功下垂调节、无功下垂调 节、转子运动特性、电气实现和电压电流双环控制 5 个模块。其中,电气实现部分包含合成电压部分和 同步电机的 2 阶电压模型。

旋转惯量 J 的动态调节在转子运动特性环节中 实现。在传统转子运动特性结构的基础上,本文提 出的基于自适应旋转惯量的 VSG 控制器中增加了 旋转惯量 J 的自适应调节控制,其具体实现过程为: ①动态获取频率的偏移量 Δf 和频率变化率 df/dt; ②比较频率的偏移量 Δf 与设定值 k 的关系,若 Δf<k 则旋转惯量为 J_0 ,若 Δf ≥ k 则需要进一步判定 df/dt 的符号;③当 Δf ≥ k、df/dt<0 时,结合滤波器参数对 旋转惯量进行调整;④当 Δf ≥ k、df/dt>0 时,旋转惯 量为 J_0 。

同步电机的二阶模型中电压方程可以表示为:

$$E^* = U_{\text{nref}} + I_{\text{sabc}}(R_a + jX_d)$$
(8)

其中, E^* 、 I_{sabe} 分别为励磁电动势、定子电流; R_a 、 X_d 分别为定子电枢电阻、同步电抗。式(8)代表同步 发电机定子的电气特性,与式(1)代表的转子机械 特性相对应,两者综合即为同步发电机的二阶模型 方程。

4 仿真分析

本文在 MATLAB/Simulink 软件平台上搭建了 如图 1 所示 VSG 结构的仿真模型,并根据文中的分 析,对自适应控制方法进行实现,由此验证本文所提 VSG 控制策略的正确性。仿真系统参数如下: $R_{\rm f}$ = 0.1 Ω , $L_{\rm f}$ = 1.5 mH, $C_{\rm f}$ = 2 000 µF, $Z_{\rm line}$ = 0.1+j0.001 Ω , $E_{\rm 0}$ = 311 V, $P_{\rm set}$ = 20 kW, $\omega_{\rm 0}$ = 314 rad/s, $Q_{\rm set}$ = 10 kvar, $\omega_{\rm g}$ = 3, D = 20, $K_{\rm up}$ = 10, $K_{\rm ui}$ = 100, $K_{\rm ip}$ = 5, $f_{\rm s}$ = 6 000 Hz, $K_{\rm v}$ = 0.1, $J_{\rm 0}$ = 0.5 kg·m²。

为了验证本文所提的自适应旋转惯量 VSG 控制策略的可行性与有效性,与传统 VSG 控制策略进行了仿真比较。

图 5 为传统 VSG 控制与自适应旋转惯量 VSG 控制的运行电压情况。

对比图 5(a) 与图 5(c) 可见, 传统 VSG 控制方 法的波形没有进入稳定状态下的波形失真严重, 稳 定以后的波峰附近亦有谐波; 而自适应旋转惯量 VSG 控制方法整体要比传统方法更好一些, 稳定状 态以后的波形更接近正弦波。对比图 5(b) 与图 5(d) 可见, 传统 VSG 控制因采用恒定的旋转惯量存 在较多的谐波, 其电压总谐波畸变率 THD(Total Harmonic Distortion) 为 7.95%, 而本 文提出的新型 VSG 控制算法的电压 THD 降低为 4.81%。

图 6 为传统 VSG 控制与自适应旋转惯量 VSG 控制的有功与无功波形。由图可见,虽然改进前、后



Fig.6 Waveforms of power under two control methods

功率的稳定性都为有功 40 kW、无功 15 kvar,两者数 值上无明显差异,但改进后的逆变器在 0.04 s 便进 入了稳定状态,而传统的逆变器在 0.08 s 进入稳态, 暂态时间过长。

图 7 为负荷阶跃变化时传统 VSG 控制和新型 VSG 控制方法下的频率波形。仿真时间为 0.7 s,初 始时负荷的有功功率为 20 kW,无功功率为 5 kvar, 0.3 s 后有功功率增至 30 kW,无功功率增至 10 kvar,0.6 s 后有功功率恢复到 20 kW,无功功率恢复 到 5 kvar。



图 7 负荷阶跃变化时的频率波形对比

Fig.7 Comparison of frequency under load step change

由图 7 可见,2 种控制方法下负荷增加都会引 起系统频率的下降,这与传统电网的特性相同。2 种控制方法下 VSG 控制频率也存在差异,传统 VSG 控制方法下频率降为 49.75 Hz,而新型 VSG 控制方 法下系统可以更快速地进入稳定状态,在负荷增大 的情况下可保证频率为 49.9 Hz,更接近工频,有助 于 VSG 的并网运行。因此,本文所提 VSG 控制方法 在稳定系统频率方面更加表现突出,大幅提高了系 统的稳定性与可靠性。

5 硬件实验

为了进一步验证本文所提 VSG 控制方法的正确性,在实验室现有设备的基础上制作了一台三相并网逆变器硬件样机,其控制策略分别采用本文所提的自适应旋转惯量 VSG 控制与传统 VSG 控制 2 种控制策略。

图 8 为并网逆变器的硬件结构框图。图中,主 电路选用 CM50MX-24A 三菱 IGBT 模块,三相全桥 逆变电路经 LC 滤波器接入母线;驱动电路采用 HCPL-316J驱动芯片;检测电路由电压、电流传感器 和信号调理电路组成,它们主要采样逆变器的直流 侧、输出侧的电压和电流、电网电压;DSP 控制板中 的控制芯片采用公司生产的芯片 DSP28335,该芯片 具有强大的事件管理能力和控制能力。



图 8 并网逆变器的硬件结构框图

Fig.8 Hardware structure of grid-connected inverter

硬件装置的相关参数与软件仿真数据基本一致。它们的取值分别为:直流侧电压 U_{de} = 450 V、电容 C_{de} = 3 300 μ F,交流滤波器的电感 L_f = 2 mH、电容 C_f = 25 μ F,交流相电压幅值 U_a = 311 V,开关频率

 $f_s = 6 \text{ kHz}$,调节周期为 0.1 ms,有功功率、无功功率 的给定值分别为 $P_{ref} = 35 \text{ kW} \setminus Q_{ref} = 0_{\circ}$

图 9、图 10 分别为本文所提 VSG 控制和传统 VSG 控制方法的稳态实验波形。本文所提 VSG 控 制的三相电流波形导入 MATLAB,通过快速傅里叶 分析得到 a、b、c 三相电流的 THD 分别为 2.2%、 2.0%、2.2%,功率因数为 99.4%;传统 VSG 控制的 a、b、c 三相电流的 THD 分别为 2.7%、2.3%、2.6%, 功率因数为 99.1%。两者稳态效果相差不多。由图 可见,2 种方法的波形类似,它们的三相电压和电流 正弦度良好,THD 为 2.5%左右,功率波动不大,本文 所提 VSG 控制指标要稍好于传统 VSG 控制。



图 11、图 12 分别为有功功率给定变化时本文所 提 VSG 控制、传统 VSG 控制方法的动态响应实验波 形。有功功率给定由 $P_{ref} = 20 \text{ kW} 变为 35 \text{ kW}, 无功$ $功率给定 <math>Q_{ref} = 0$ 保持不变。由图可见,本文所提 VSG 控制基本无超调,但传统 VSG 控制存在超调, 系统达到稳定的时间更长。

与有功变化情况类似,由无功变化时2种控制



图 11 有功功率给定变化时所提 VSG 控制的动态响应实验波形





图 12 有功功率给定变化时传统 VSG 控制的动态响应实验波形

Fig.12 Experimental waveforms of dynamic response under traditional VSG control when given active power changes

方法的动态响应实验波形(因篇幅限制略去)同样 可见,本文所提 VSG 控制的超调小于传统 VSG 控 制,且响应速度也稍快。

因此,硬件实验结果明了本文所提 VSG 控制的 有效性和正确性。

6 结论

针对传统 VSG 控制中存在暂态过程长、电能质 量差的缺点,本文提出了一种基于自适应旋转惯量 的 VSG 控制策略。根据负载扰动引起的频率变化 量实时动态调节旋转惯量,能够避免频率迅速上升 和跌落,改善频率响应特性。当系统中有较大负荷 的投入或者切除时,系统的频率偏移大于设定数值, 采用新型旋转惯量控制方法可减少系统频率变化带 来的问题。通过分析与实验可得出以下结论:

a. 相比于传统 VSG 方法,本文所提 VSG 控制方法缩短了系统暂态过程,系统达到稳定的时间更短;

b. 本文所提 VSG 控制方法抵消了系统中的大量谐波,改善了 VSG 的电能质量;

c. 本文所提 VSG 控制方法减小了输出频率下降的问题,在稳定系统频率方面表现更加突出,提高了系统频率的稳定性与可靠性。

参考文献:

- [1]杨小龙,程启明,褚思远,等.孤岛模式下光储直流微电网变功 率控制策略[J].电力自动化设备,2016,36(11):67-75.
 YANG Xiaolong, CHENG Qiming, CHU Siyuan, et al. Variable power control of photovoltaic-battery DC microgrid in islanding mode[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(11):67-75.
- [2] WANG Z, CHEN B, WANG J, et al. Decentralized energy management system for networked microgrids in grid-connected and islanded modes [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7 (2):1097-1105.
- [3] WANG Chengshan, LI Yan, PENG Ke, et al. Coordinated optimal design of inverter controllers in a micro-grid with multiple distributed generation units[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3):2679-2687.
- [4] KIM J,GUERRERO J M,RODRIGUEZ P, et al. Mode adaptive droop control with virtual output impedances for an inverter-based flexible AC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3):689-701.
- [5] HE J, LI Y, BOSNJAK D, et al. Investigation and active damping of multiple resonances in a parallel-inverter based microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1):234-246.
- [6] YAZDANIAN M, MEHRIZI-SANI A. Washout filter-based power sharing[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7 (2): 967-968.
- [7] XU Jianzhong, ZHAO Chengyong. A coherency-based equivalence method for MMC inverters using virtual synchronous generator control[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1369-1378.
- [8] 吕志鹏,盛万兴,钟庆昌,等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2591-2603.
 LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual dynchronous generator and its applications in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(16):2591-2603.
- [9] 陈昕,张昌华,黄琦. 引入功率微分项的并网下垂控制逆变器小 信号建模与分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(2):151-157.
 CHEN Xin,ZHANG Changhua,HUANG Qi. Small-signal modeling with power differential term for droop control inverter and analysis
 [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2):151-157.
- [10] 肖湘宁,陈萌.不平衡电压下虚拟同步发电机功率控制策略
 [J].电力自动化设备,2017,37(8):193-200.
 XIAO Xiangning,CHEN Meng. Power control of virtual synchronous generator under unbalanced grid voltage[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(8):193-200.
- [11] ZHONG Q, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [12] 李东东,朱钱唯,程云志,等. 基于自适应惯量阻尼综合控制算法的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电力自动化设备,2017,37
 (11):72-77.

LI Dongdong, ZHU Qianwei, CHENG Yunzhi, et al. Control strategy

of virtual synchronous generator based on self-adaptive rotor inertia and damping combination control algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(11):72-77.

- [13] BRABANDERE K D, BOLSENS B, KEYBUS J V D, et al. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(4):1107-1115.
- [14] ZHONG Qingchang, NGUYEN P, MA Zhenyu, et al. Self-synchronized synchronverters: inverters without a dedlcated synchronization unit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 617-630.
- [15] 刘喜梅,赵倩,姚致清. 基于改进下垂算法的同步逆变器并联控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(14):103-108.
 LIU Ximei,ZHAO Qian,YAO Zhiqing. Research on control strategy of parallel synchronous inverters based on improved droop algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2012,40(14):103-108.
- [16] 程军照,李澍森,吴在军,等. 微电网下垂控制中虚拟电抗的功率解耦机理分析[J]. 电力系统自动化,2012,36(7):27-32.
 CHENG Junzhao,LI Shusen,WU Zaijun, et al. Analysis of power decoupling mechanism for droop control with virtual inductance in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 27-32.
- [17] ASHABANI M, MOHAMED A R I. Novel comprehensive control framework for incorporating VSCs to smart power grids using bidirectional synchronous-VSC[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2):943-957.
- [18] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia [J].
 IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(2):451-458.
- $[\,19\,]$ SHINTAI T, MIURA Y, ISE T. Reactive power control for load sharing proceedings with virtual synchronous generator control [C] $/\!/$

Proceedings of 7th International Power Electronics and Motion Control Conference. Harbin, China: IEEE, 2012:846-845.

[20] TOMES L M A, LOPES L A C, MORAN T L A, et al. Self-tuning virtual synchronous machine: a control strategy for energy storage systems to support dynamic frequency control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014,9(4):833-840.

作者简介:



程启明(1965—),男,江苏盐城人,教授,研究方向为电力系统自动化、发电过程控制、先进控制及应用等(E-mail:chengqiming@sina.com);

余德清(1992—),男,江苏徐州人,硕 士研究生,研究方向为电力系统自动化等 (E-mail:602597365@qq.com);

程尹曼(1990—), 女, 上海人, 硕士研究生, 研究方向为 电力系统自动化、新能源发电控制等(E-mail: chengyinman@ hotmail.com);

高 杰(1993—),男,浙江温州人,硕士研究生,研究方 向为电力系统自动化、继电保护等(E-mail: iamgaojie1993@ 163.com);

张 宇(1992—),女,江苏淮安人,硕士研究生,研究方 向为电力系统自动化、电机控制等(E-mail:1499021689@qq. com);

谭冯忍(1992—),女,安徽淮南人,硕士研究生,研究方向 为电力系统自动化、新能源发电控制等(E-mail:1520947405@ qq.com)。

Control strategy of virtual synchronous generator based on adaptive rotational inertia

CHENG Qiming¹, YU Deqing¹, CHENG Yinman², GAO Jie¹, ZHANG Yu¹, TAN Fengren¹

(1. College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. North Power Supply Branch, Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200041, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of long transient process and poor power quality in VSG(Virtual Synchronous Generator), a control strategy of VSG based on adaptive rotational inertia is proposed. Based on introducing the existing problems of traditional VSG control, a new VSG control strategy is proposed, and the schemes of active and reactive power regulation for the new grid-connected VSG are analyzed. The proposed VSG control strategy can dynamically adjust the rotational inertia in real time according to the frequency variation caused by load disturbance, thus avoiding the rapid rise and fall of frequency and improving the frequency response characteristics. The results of MATLAB/Simulink software simulation and hardware experiment verify the effectiveness and feasibility of the proposed VSG control method. Compared with the traditional VSG control method, the proposed VSG control method has better stability, faster response speed, smaller overshoot and lower harmonics.

Key words: microgrid; rotational inertia; virtual synchronous generator; electric inverters; adaptive control