

DOI: 10.7667/PSPC171667

具有阻尼和惯性的电流下垂控制研究

雪晓菲¹, 厉虹¹, 吕志鹏²

(1. 北京信息科技大学自动化学院, 北京 100192; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 针对虚拟同步发电机控制策略的优良特性, 研究了其在电流下垂控制中的应用。采用电流下垂控制算法取代虚拟同步发电机的有功/频率调节和无功/电压调节控制策略, 保留其机械转动所具有的惯性和阻尼特性, 舍弃其定子电气模块, 使逆变器不仅具有电流下垂控制的优越性能, 而且具备虚拟同步发电机的阻尼和惯性特征, 增强电网频率和电压幅值的稳定性。通过在电压/电流双闭环控制器中引入虚拟阻抗, 提升并网逆变器的鲁棒性。仿真实验结果验证了所提出控制策略的可行性和有效性。

关键词: 虚拟同步发电机; 电流下垂控制; 逆变器; 虚拟阻抗

Study on current droop control with damping and inertia

XUE Xiaofei¹, LI Hong¹, LÜ Zhipeng²

(1. College of Automation, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The application of virtual synchronous generator algorithm in current droop control is studied for the excellent characteristics of control strategy of virtual synchronous generator. Current droop control method is used to replace the control strategy of the active power/frequency adjustment and reactive power/voltage regulation based on the mathematical model of virtual synchronous generator, reserving the inertia and damping characteristics of the mechanical rotation of the synchronous generator and discarding its stator electrical model, so that the inverter not only has the superior performance of the current droop control, but also owns damping and inertial characteristics of the synchronous generator, and increasing the stability of grid frequency and voltage amplitude. The grid-connected inverter's robustness is enhanced by introducing virtual impedance in voltage/current closed-loop controller. Simulation results verify the feasibility and effectiveness of the proposed control strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 11472058).

Key words: virtual synchronous generator; current droop control; inverter; virtual impedance

0 引言

大力开发清洁能源是缓解当今世界能源危机、环境恶化的有效途径之一。随着电力系统中以清洁能源为主要形式的分布式发电单元迅猛发展, 清洁能源在电网系统中的渗透率也快速增加。当其受到负载端大规模扰动时, 由于在短时间内缺乏足够的能量以平衡这种扰动而很容易造成电网系统的不稳定。最具挑战性的问题是基于逆变器的分布式发电

(Distributed Generation, DG)单元与电网同步, 即使电网发生干扰或变化, 仍然与电网同步。要解决此问题还需要在基于逆变器的控制策略中进行分析研究^[1-2]。

通过控制逆变器的开关模式, 将其模拟出具有同步发电机的特性。该控制方案称为虚拟同步发电机(Virtual Synchronization Generator, VSG)技术。在VSG概念中, DG单元的电力电子接口被模拟为同步发电机端口, 将其控制方式策略相应地模拟出同步发电机内部系统的各种响应与扰动。同步发电机根据其受到的指令对其输出的电压、频率和相位进行控制。同时, 其机械转子转动所具有的惯性使得同步发电机对电网频率和电压的稳定性具有积极作用。

基金项目: 国家自然科学基金项目(11472058); 国家电网公司科技项目(EPRIPDKJ[2016]2252); 国网浙江省科技项目(5211SX1500R6)

而 VSG 作为同步发电机的模拟装置, 相应地, 虚拟同步发电机也有助于电网电压和频率的稳定^[3-17]。

文献[7]建立了虚拟同步发电机的数学模型, 并提出完整的虚拟同步发电机有功、无功调节控制器, 给出了一种基于虚拟同步发电机技术的微电网无缝切换控制策略。文献[8]使用粒子群优化来调整 VSG 单元的参数, 使其在受到干扰之后可以平滑过渡以及将发电机的电压角偏差保持在特定的限制内。文献[9]利用瞬态能量方法对交变惯性方案的阻尼效应进行研究, 提出了在电力系统的电机附近采用惯量稳定性控制的策略。文献[10]通过改进虚拟同步发电机的控制结构, 可使逆变器根据工作模式在一次调频和二次调频之间切换。

由以上的分析可以发现, 虚拟同步发电机控制算法对新能源并网和电力系统稳定运行具有潜在的研究价值。传统的同步发电机相对于清洁新能源并网逆变器而言, 前者最大优势就在于具有阻尼和惯性, 当电网受到扰动时, 防止电网频率和电压过快变化而造成电网的不稳定。

本文借鉴虚拟同步发电机的控制策略, 提出了基于电流下垂控制算法的虚拟同步发电机控制策略。将电流下垂控制代替虚拟同步发电机的有功/频率调节和无功/电压调节控制。只需采集输出的电流, 而不需要采集电压, 简化了控制算法。同时, 舍弃定子电磁模型, 保留同步发电机的机械方程所具有的惯性和阻尼特性, 使逆变器不仅具有电流下垂控制的优越性能, 而且具备同步发电机的阻尼和惯性特征。同时, 通过在电压/电流双闭环控制器中引入虚拟阻抗, 增强逆变器运行的鲁棒性。

1 虚拟同步发电机的数学模型

图 1 为三相电压型并网逆变器的主电路结构, 直流侧是以清洁能源为主的分布式电源, 为了简化分析, 直接采用直流源代替。Q₁~Q₆ 为 IGBT 开关管, R、L、C 分别为逆变器的电感寄生电阻、滤波电感和滤波电容。通过同步控制等措施, 电能最终经过公共耦合点(Point of Common Coupling, PCC)流入电网。

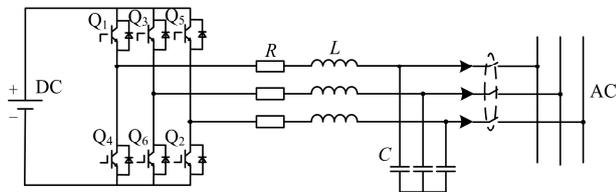


图 1 三相电压型逆变器主电路

Fig. 1 Circuit of three-phase voltage source inverter

图 2 为虚拟同步发电机的控制算法框图^[7]。由控制框图可知, 虚拟同步发电机无功调节部分输出的虚拟电势 E 可表示为

$$E = \Delta E_Q + E_o + \Delta E_U = k_q(Q_{\text{ref}} - Q) + E_o + k_v(U_{\text{ref}} - U) \quad (1)$$

式中: ΔE_Q 、 E_o 、 ΔE_U 分别为无功功率调节值、虚拟同步发电机空载电动势和机端电压调节值; k_q 、 k_v 分别为无功调节系数和电压调节系数; Q_{ref} 、 Q 分别为参考无功功率和逆变器机端输出的瞬时无功功率值; U_{ref} 、 U 分别为逆变器机端电压的参考值和输出值。

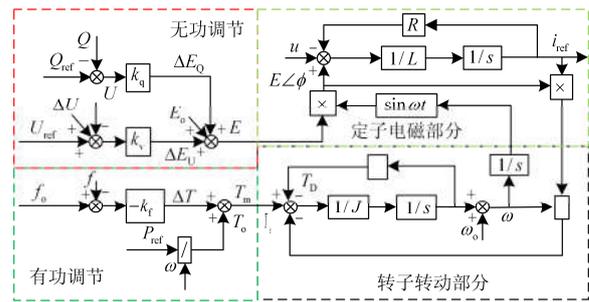


图 2 虚拟同步发电机控制的控制框图

Fig. 2 Control strategy of the VSG

由于同步发电机的无功输出和机端电压是通过调节励磁实现的, 所以虚拟同步发电算法的无功调节模块也主要为了模拟此过程, 即通过虚拟电势 E 对逆变器输出的电压和无功功率进行调节。

有功调节部分的机械转矩 T_m 可表示为

$$T_m = T_o + \Delta T = \frac{P_{\text{ref}}}{\omega} - k_f(f_o - f) \quad (2)$$

式中: T_o 、 ΔT 分别为机械转矩指令值和频率偏差反馈指令值; f_o 、 f 、 ω 分别为系统额定频率、虚拟同步发电机输出侧的电网频率和角频率; P_{ref} 和 k_f 分别为有功功率指令值及频率响应系数。此处的有功调节原理是模拟了传统同步发电机输出有功功率的调节过程。

转子运动方程模拟同步发电机转子运动的特性, 表示为

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - T_D = T_m - T_e - D_p(\omega - \omega_o) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (3)$$

式中: T_m 、 T_e 和 T_D 分别为同步发电机的机械、电磁和阻尼转矩; J 、 D_p 分别为同步发电机的转动惯量和阻尼系数; ω 、 ω_o 分别为同步发电机的机械角频率和电网角频率(此处令同步发电机的极对数为 1, 则 ω 既为同步发电机的机械角频率, 也为其电

气角频率)。

定子电气部分可表示为

$$L \frac{di}{dt} = E - u - Ri \quad (4)$$

式中, L 、 E 、 u 、 i 、 R 分别为同步发电机的同步电感、电势、机端电压、输出电流和定子电阻。

由以上分析可知, 虚拟同步发电机的机械部分和电气部分主要是由转子运动方程和定子电气方程进行模拟, 通过采集电网电压、电流和频率的信息, 依据控制算法进行有功调频和无功调压。

2 所提控制策略与输出阻抗设计

2.1 控制策略

图 3 为本文所提出的具有阻尼和惯性的电流下垂控制总体框图。由图可知, 所提出的控制策略包括电流下垂控制器、虚拟同发电机机械转动算法和三相电压合成模块。通过对逆变器输出电流的采集, 经过计算得出电网输出的有功电流 I_p 和无功电流 I_q 作为电流下垂器的输入量。通过电流下垂控制算法产生参考电压 E 和频率 ω 的指令值。其中, 将频率 ω 作为虚拟同步发电机控制器机械转动算法的输入量, 将电压 E 直接送入三相电压合成模块。在虚拟同步发电机控制器的作用下生成相位角 θ 。最后, 经过三相电压合成计算得出三相参考电压 E_{abc} 。

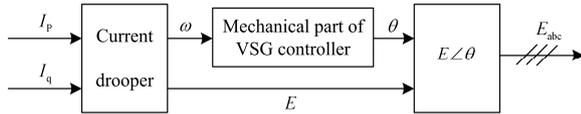


图 3 所提出的控制策略框图

Fig. 3 Block diagram of proposed control strategy

图 4 为基于线路等效阻抗呈感性条件下的电流下垂控制框图。由图可得, 电流下垂控制可以表示为^[18]

$$\begin{cases} \omega = \omega^* - a(I_p - I_p^*) \\ E = U^* + b(I_q - I_q^*) \end{cases} \quad (5)$$

式中: ω^* 、 U^* 、 I_p^* 、 I_q^* 分别是额定角频率、幅值、有功电流指令值和无功电流指令值; a 、 b 分别为有功电流频率下垂系数和无功电流电压下垂系数。

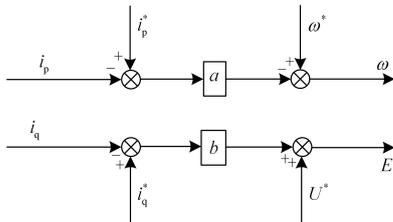


图 4 电流下垂控制算法

Fig. 4 Algorithm of current droop control

下垂系数 a 和 b 直接影响着系统的动态响应, 不过系统最终会达到稳定。

图 5 为虚拟同步发电机机械转动算法的框图。由图可知, 该模块中含有阻尼系数 D_p 和惯性系数 J 。所提出的虚拟同步发电机机械转动模块的数学表达式为

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - T_D = \\ P_{ref} / \omega - P_e / \omega - D_p (\omega - \omega_0) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (6)$$

式中, 逆变器输出的虚拟机械功率 P_{ref} 指令值为

$$P_{ref} = E^* \cdot I_d \quad (7)$$

逆变器输出的虚拟电磁功率 P_e 为

$$P_e = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (8)$$

式中: e_j 和 i_j (j 为 a,b,c) 分别为逆变器输出的三相电压和电流。

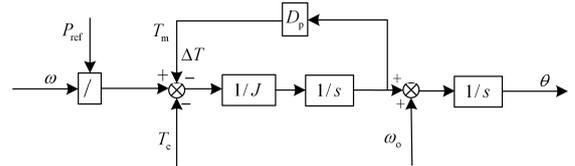


图 5 虚拟同步发电机机械转动模块

Fig. 5 Mechanical rotation model of VSG

由于传统的同步发电机与当前以清洁能源为主要形式的分布式发电并网逆变器相比, 前者最大的优势在于具有阻尼和惯性。当电网受到负载等扰动时, 其输出电压幅值和频率在动态响应过程中具有惯性, 阻尼电网频率和电压幅值的振荡和波动。将逆变器采用虚拟同步发电机控制策略, 也主要是为了尽量模拟此特性, 实现维护电网安全稳定运行的目的。本文将此特性应用到电流下垂控制算法中, 同样也是为了达到此目的。

2.2 输出阻抗设计

电压/电流双闭环控制器的性能对逆变器的稳态和动态性能有重要的影响。本文采用基于电感电流反馈的内环和基于电容电压外环的双环控制方式, 系统框图如图 6 所示。控制器外环采用 PI 控制器, 以达到稳定并网逆变器输出电压并使其稳态误差为零的目的, 其中 K_p 和 K_i 分别是其比例和积分参数; 电流内环直接采用比例 P 控制器, 以提高并网逆变器的电流响应速度, 其中 K_c 为电流控制器比例系数, K_{PWM} 为并网逆变器增益。

适当选择并网逆变器的物理参数和合理地控制

参数可以保证系统的正常运行。为了抑制低频段干扰信号对系统的影响, 提升并网逆变器的安全运行空间, 通过在控制环中引入虚拟阻抗, 增强逆变器的鲁棒性^[19-26]。

加入虚拟阻抗后的电压/电流双环控制框图如图 6 所示。

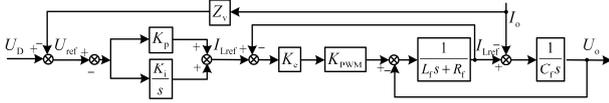


图 6 引入虚拟阻抗后的电压电流双环控制框图

Fig. 6 Block diagram of the double closed-loop control inverter introducing virtual resistors

由图 6 可得, 系统的输出电压可表示为

$$U_o(s) = G(s)U_D(s) - (Z_o(s) + G(s))I_o(s) \quad (9)$$

式中: U_D 为电流下垂控制器输出的参考电压; $G(s)$ 为系统的电压增益; $Z_o(s)$ 为闭环控制系统的等效输出阻抗, 可表示为

$$G(s) = [K_e K_p K_{P_{PWM}} s + K_e K_i K_{P_{PWM}}] / [L_f C_f s^3 + C(K_e K_{P_{PWM}} + R_f) s^2 + (K_e K_p K_{P_{PWM}} + 1) s + K_e K_i K_{P_{PWM}}] \quad (10)$$

$$Z_o(s) = [L_f s^2 + (K_e K_{P_{PWM}} + R_f) s] / [L_f C_f s^3 + C(K_e K_{P_{PWM}} + R_f) s^2 + (K_e K_p K_{P_{PWM}} + 1) s + K_e K_i K_{P_{PWM}}] \quad (11)$$

逆变器总的等效输出阻抗可以表示为

$$Z_o^* = Z_o(s) + G(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (12)$$

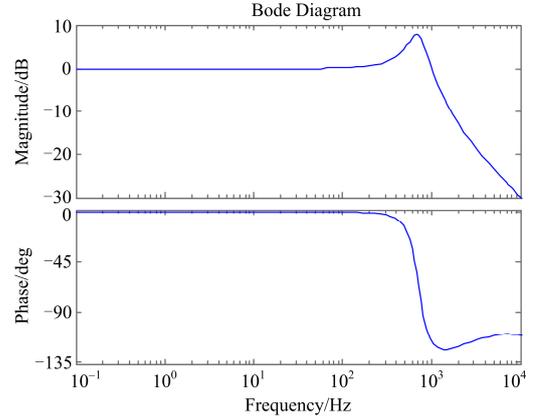
式中:

$$N(s) = L_f s^4 + [\omega k L_f + K_e K_{P_{PWM}} + R_f] s^3 + [\omega k (K_e K_{P_{PWM}} + R_f) + \omega^2 L_f] s^2 + [\omega^2 (K_e K_{P_{PWM}} + R_f) - K_e K_p K_{P_{PWM}} L_v k \omega^3] s + \omega^3 k k_e k_i K_{P_{PWM}} L_v$$

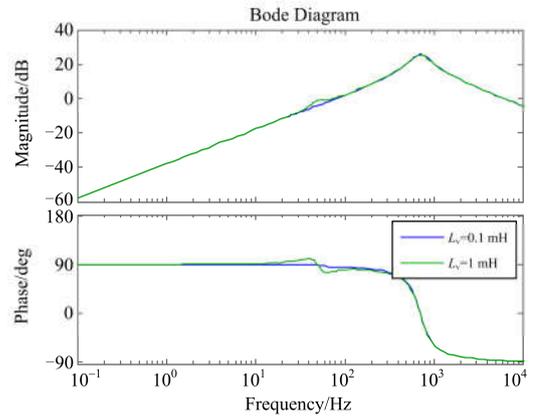
$$D(s) = L_f C_f s^5 + C_f (\omega k L_f + K_e K_{P_{PWM}} + R_f) s^4 + [\omega k C_f (K_e K_{P_{PWM}} + R_f) + K_p K_e k_{P_{PWM}} + L_f C_f \omega^2 + 1] s^3 + [\omega k + K_e K_{P_{PWM}} (K_i + k \omega K_p) + \omega^2 C_f (K_e K_{P_{PWM}} + R_f)] s^2 + [\omega K_e (\omega K_p K_{P_{PWM}} + k K_i) + \omega^2] s + \omega^2 K_e K_i K_{P_{PWM}}$$

控制系统引入虚拟阻抗后, 虚拟阻抗 L_v 分别取 1 mH 和 0.1 mH 时, 并网逆变器的电压增益 $G(s)$ 和等效阻抗 Z_o^* 的 Bode 图如图 7 所示, 其中系统参数

参照表 1。



(a) $G(s)$ 的 Bode 图



(b) $Z_o^*(s)$ 的 Bode 图

图 7 $G(s)$ 和 $Z_o^*(s)$ 的 Bode 图

Fig. 7 Bode diagram of $G(s)$ and $Z_o^*(s)$

如图 7(a)所示, 在该参数的作用下, 电压增益传递函数 $G(s)$ 在基频处的增益 $|G(s)|=1$, 表明了电压电流双闭环控制系统的输出信号 U_o 能够较好地跟踪输入信号 U_{ref} 。图 7(b)则表明了并网逆变器的等效输出阻抗在工频附近呈现感性。

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

参数	取值	参数	取值
U_{DC}/V	700	K_e	1
R_f/Ω	0.1	K_p	0.05
$C_f/\mu F$	20	K_i	500
L_f/mH	1.5	f_s/kHz	10

由逆变器的等效输出阻抗 Z_o^* 的频域响应曲线可以看出, 在系统中引入虚拟阻抗后, 并网逆变器的等效输出阻抗的幅频特性只有在基波频率附近很小的范围内增益较大, 并且随着加入虚拟电感量的增大而增大, 而在非基波频率处其增益几乎没有任何变化, 即控制系统中加入虚拟阻抗后, 对低频段

的其他信号影响较小，可以忽略不计，这也使得其能够在增大系统等效输出阻抗的前提下，进而可以更好地将电流下垂控制策略应用于弱电网环境中。

3 仿真与分析

为了验证本文所提出控制算法的正确性和有效性，在 Matlab/Simulink 中搭建了逆变器的仿真模型。其中系统电路参数参照表 1。线路长度为 150 m，线路的感抗和电阻参数分别取 0.083 Ω/km、0.642 Ω/km。IGBT 的开关频率选为 10 kHz。仿真过程如下：初始时刻 $t=0$ 时，有功功率 $P=5$ kW，无功功率 $Q=1$ kvar；在 $t=1.5$ s 时，负载所需有功功率增加至 $P=7$ kW，无功功率增加至 $Q=1.5$ kvar；当 $t=2.5$ s 时，负载功率又恢复至有功功率 $P=5$ kW，无功功率 $Q=1$ kvar。

图 8 所示为单独采用电流下垂控制策略和采用所提出的控制策略时，在负载功率变化的过程中，逆变器输出的电压幅值和频率变化曲线。可以明显地看出，当负载变化时，电流下垂控制所输出的电压频率和幅值波动较大，而采用本文提出的控制策略所输出电网频率和电压幅值比较稳定，波动较小。表明了所提出的控制策略对电网频率和电压的稳定性具有积极作用。

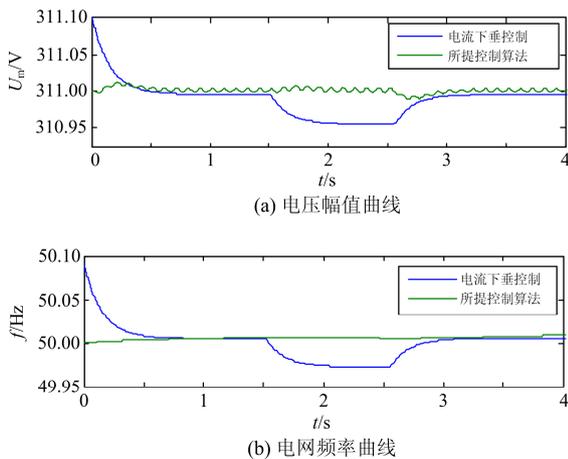


图 8 对比实验仿真波形

Fig. 8 Contrast of experimental waveforms

图 9 和图 10 分别为在所提出的控制策略中未加入虚拟阻抗和加入虚拟阻抗时，逆变器输出电压与电流的波形。由仿真结果可知：当逆变器受到负载变化的影响时，控制策略中未加入虚拟阻抗的逆变器稳定性较差，输出的电压和电流严重地偏离了正常范围，也不再具有良好的正弦波形，对逆变器的安全稳定运行构成了严重的威胁；而控制策略中加入虚拟阻抗的逆变器输出的电压和电流波形具有良

好的正弦性和稳定性。证明了虚拟阻抗的引入提升了电网系统的安全运行空间，增强了逆变器的鲁棒性。

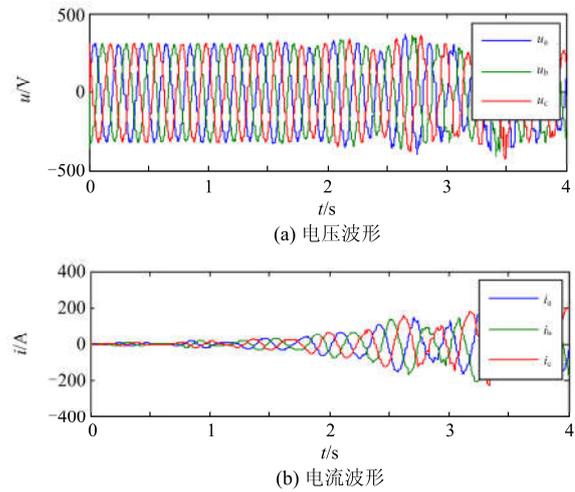


图 9 未加入虚拟阻抗的仿真波形

Fig. 9 Simulation waveforms without virtual impedance

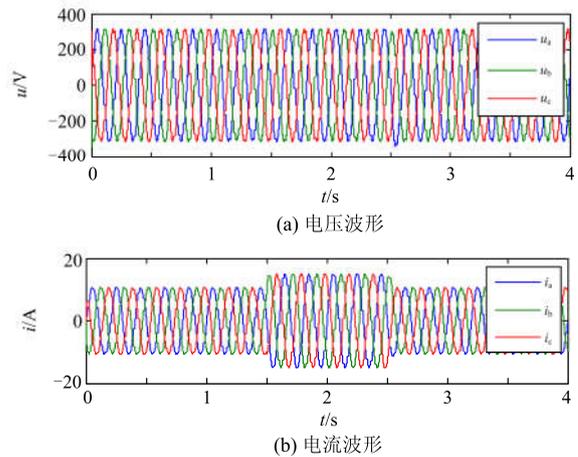
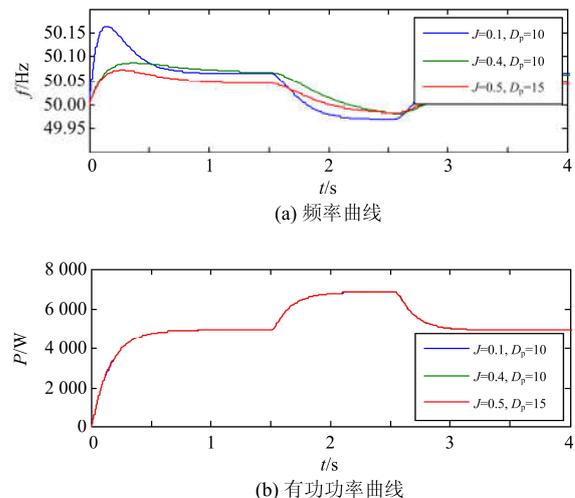


图 10 加入虚拟阻抗的仿真波形

Fig. 10 Simulation waveforms with virtual impedance



(b) 有功功率曲线

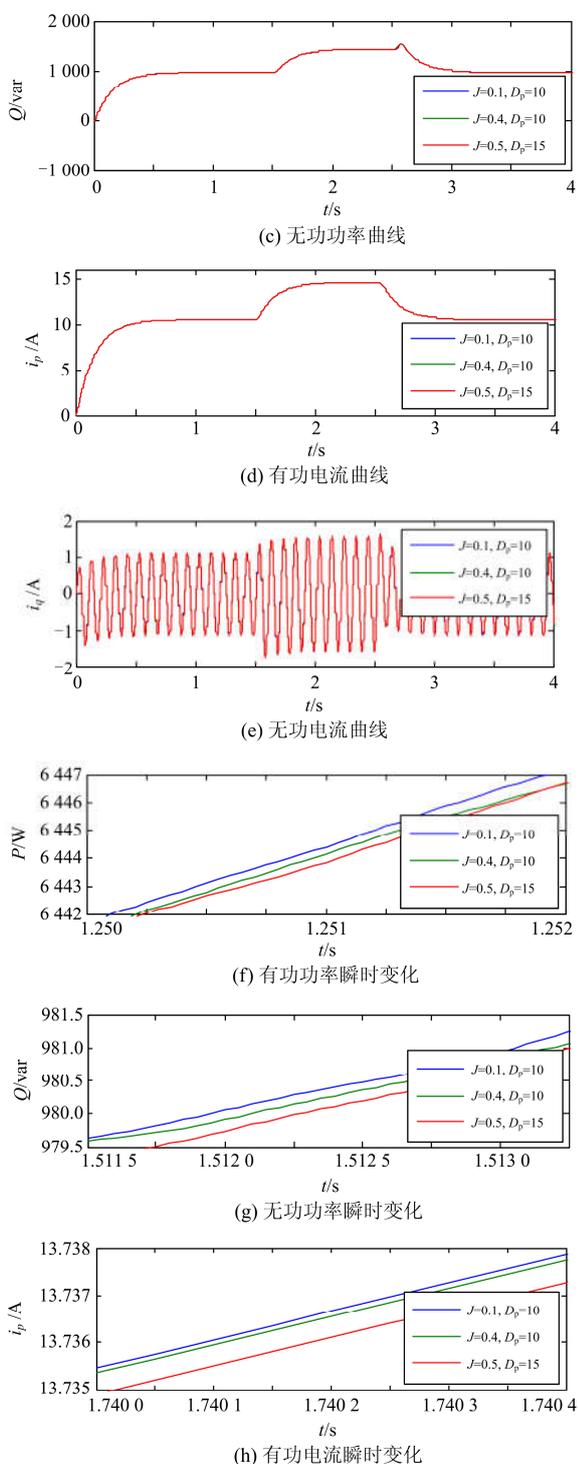


图 11 不同阻尼和惯性系数时的仿真波形

Fig. 11 Simulation waveforms with different damping and inertia coefficients

图 11 为在虚拟惯量 J 和阻尼系数 D_p 取不同数值时的仿真波形。逆变器输出的电网频率变化曲线如图 11(a)所示, 当阻尼系数 D_p 取 $10 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$, 惯量 J 分别取 $0.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 和 $0.4 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 时, 阻尼系数相同

时, 惯性系数越大, 频率波动越小, 受到扰动的影响也越微弱; 当惯量 J 取 $0.4 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 而阻尼系数 D_p 分别取 $10 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$ 和 $15 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$ 时, 当负载受到扰动时, 阻尼系数越大, 逆变器输出的电压频率受到的波动越小。表明了虚拟同步发电机机械转动模型中所具有的阻尼和惯性在这里依然适用, 再次证明了所提出控制策略的有效性。

图 11(b)~图 11(e)分别在不同惯量和阻尼的条件下, 逆变器输出的有功功率曲线、无功功率曲线、有功电流曲线和无功电流曲线。由输出曲线的动态变化可知: 在负载发生变化时, 该策略控制的逆变器具有良好的动态响应。

图 11(f)~图 11(h)分别为在不同阻尼系数的控制下, 当负载所需功率发生波动时, 系统输出的有功功率、无功功率和有功电流动态变化曲线。可以看出, 惯量系数和阻尼系数越大, 其动态变化越缓慢。反之亦然。表明在系统发生扰动时, 惯量和阻尼可以有效地减轻负载功率变化对电网的冲击, 增强电网的安全稳定性。

为了进一步研究所提出的控制方法, 在基于 TMS320F28335DSP 控制系统测试平台上进行了单台逆变器的实验。采用所提出的控制算法对逆变器进行控制, 系统主电路为三相桥式拓扑, 直流侧电压为 $U_{DC}=570 \text{ V}$, 逆变器输出的线电压为 $U_{Line}=100 \text{ V}$, 负载采用三个 $800\text{W}100\text{RJ}$ 的电阻。由于实验条件的限制, 只对逆变器的输出电压进行了采样, 图 12 为逆变器输出的电压波形, 可以看出输出的电压波形具有良好的正弦性。

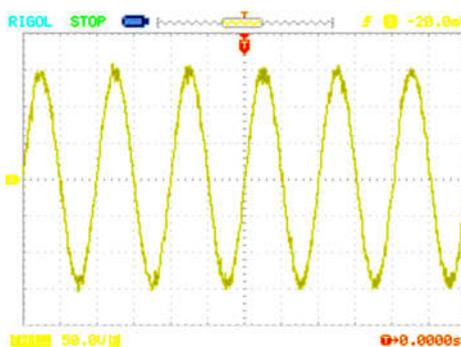


图 12 实验波形

Fig. 12 Experimental waveform

4 结论

本文针对虚拟同步发电机控制算法的优良特性, 提出了使电流下垂控制具有阻尼和惯性的控制策略。将电流下垂控制代替虚拟同步发电机的有功/频率调节和无功/电压调节控制。只需采集输出的电

流, 而不需要采集电压, 减少了计算量。同时, 舍弃定子电气部分模型, 保留虚拟同步发电机的机械方程所具有的惯性和阻尼特性, 使逆变器具备了同步发电机的阻尼和惯性特征。通过在电压/电流双闭环控制器中引入虚拟阻抗, 增强了逆变器的鲁棒性。经过分析和仿真实验, 表明了所提出的控制策略为逆变器增加了阻尼和惯性, 能够有效地阻尼电网受到干扰后的冲击, 提高了电网频率和电压的稳定性。

参考文献

- [1] OLIVARES D, SANI A M, ETEMADI A, et al. Trends in microgrid control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1905-1919.
- [2] 周强, 汪宁渤, 何世恩, 等. 高弃风弃光背景下中国新能源发展总结及前景探究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 146-154.
ZHOU Qiang, WANG Ningbo, HE Shien, et al. Summary and prospect of China's new energy development under the background of high abandoned new energy power[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 146-154.
- [3] HE Jinghan, LIU Lin, DING Fanfan, et al. A new coordinated backup protection scheme for distribution network containing distributed generation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 102-110. DOI: 10.1186/s41601-017-0043-3.
- [4] ZHANG L, HARNEFORS L, NEE H P. Power synchronization control of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 809-820.
- [5] BLAABJERG F, TEODORESCU R, LISERRE M, et al. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1398-1409.
- [6] 赵嘉兴, 高伟, 上官明霞, 等. 风电参与电力系统调频综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 157-169.
ZHAO Jiaying, GAO Wei, SHANGGUAN Mingxia, et al. Review on frequency regulation technology of power grid by wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 157-169.
- [7] 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): 2951-2963.
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2951-2963.
- [8] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Stability assessment and optimization methods for microgrid with multiple VSG units[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1462-1471.
- [9] 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.
- [10] 王振雄, 易皓, 卓放, 等. 应用于光伏微网的一种虚拟同步发电机结构及其动态性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 444-453.
WANG Zhenxiong, YI Hao, ZHUO Fang, et al. A hardware structure of virtual synchronous generator in photovoltaic microgrid and its dynamic performance analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 444-453.
- [11] 吕志鹏. 虚拟同步机技术构建“源—网—荷”友好互动新模式[J]. 供用电, 2017, 34(2): 32-34, 27.
LÜ Zhipeng. New pattern of source-grid-load friendly interaction based on virtual synchronous machine technology[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(2): 32-34, 27.
- [12] 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.
LÜ Zhipeng, JIANG Wenqian, SHAN Yang, et al. Three phase boost type PWM rectifier based on virtual synchronous machine technology[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(4): 47-51.
- [13] 韩蒲峰, 陈堂功, 范佳莹, 等. 基于虚拟阻抗的 VSG 控制策略研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(7): 38-42.
HAN Pufeng, CHEN Tanggong, FAN Jiaying, et al. Research on VSG control strategy based on virtual impedance[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(7): 38-42.
- [14] 贺顺兴, 王松, 杨龙, 等. 基于功率完全解耦的逆变器并联控制策略研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(6): 42-46.
HE Shunxing, WANG Song, YANG Long, et al. An inverter parallel control strategy research based on completely decoupled power[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(6): 42-46.
- [15] BEVRANI H, ISE T, MIURA Y. Virtual synchronous generators: a survey and new perspectives[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 54: 244-254.
- [16] LIU J, MIURA Y, ISE T. Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5):

- 3600-3611.
- [17] 李斌, 周林, 余希瑞, 等. 基于改进虚拟同步发电机算法的微网逆变器二次调频方案[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2680-2687.
LI Bin, ZHOU Lin, YU Xirui, et al. Secondary frequency regulation for microgrid inverters based on improving virtual synchronous generator[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2680-2687.
- [18] 郭忠南, 张纯江, 李福林, 等. 基于鲁棒电流下垂控制的不同容量逆变器并联控制研究[J]. 燕山大学学报, 2017, 41(2): 133-141.
GUO Zhongnan, ZHANG Chunjiang, LI Fulin, et al. Power control of paralleled inverters with different power ratings based on robust current droop control[J]. Journal of Yanshan University, 2017, 41(2): 133-141.
- [19] 袁敞, 丛诗学, 徐衍会. 应用于微电网的并网逆变器虚拟阻抗控制技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 144-154.
YUAN Chang, CONG Shixue, XU Yanhui. Overview on grid-connected inverter virtual impedance technology for microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 144-154.
- [20] 赵济乾, 赵晋斌, 孙锋, 等. 基于可控等效输出阻抗的微网逆变器并联特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 194-100.
ZHAO Jiqian, ZHAO Jinbin, SUN Feng, et al. Research on microgrid inverters parallel characteristic based controllable equivalent output impedance[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 194-100.
- [21] 丁凯, 陈章妍, 黄萌, 等. 阻感性负载下单相离网逆变器稳定性分析与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 80-86.
DING Kai, CHEN Zhangyan, HUANG Meng, et al. Stability analysis and control of single-phase off-grid inverters with inductive loads[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 80-86.
- [22] 刘文军, 周龙, 陈剑, 等. LCL 并网逆变器的电流双闭环控制[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 52-57.
LIU Wenjun, ZHOU Long, CHEN Jian, et al. Control method for grid-connected inverter with LCL filter by employing dual current closed-loops[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 52-57.
- [23] 闫朝阳, 白鹤, 张喆, 等. 不平衡工况下基于虚拟阻抗法的并联三相四桥臂逆变器的桥臂控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(23): 207-219.
YAN Zhaoyang, BAI He, ZHANG Zhe, et al. Leg control of parallel three-phase four-leg inverter based on virtual impedance method under unbalanced conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(23): 207-219.
- [24] 卞文倩, 李飞, 赵晋斌. 基于 LCL 型逆变器的数字陷波器有源阻尼方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 14-19.
BIAN Wenqian, LI Fei, ZHAO Jinbin. Research on digital notch filter active damping based on LCL-type inverter[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 14-19.
- [25] 高骏, 王磊, 周文, 等. 双馈风电机组电网背景谐波运行与谐波抑制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 164-169.
GAO Jun, WANG Lei, ZHOU Wen, et al. Study on operating behavior and suppression strategy of doubly-fed induction generators wind turbine under harmonic grid voltage conditions[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 164-169.
- [26] 麦倩屏, 陈鸣. 用于多微源低压微电网的虚拟阻抗反下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 96-102.
MAI Qianping, CHEN Ming. P-V/Q-f droop control strategy with virtual impedance for low-voltage microgrid with multiple micro sources[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 96-102.

收稿日期: 2017-11-11; 修回日期: 2018-01-30

作者简介:

雪晓菲(1990—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术在微电网及配电网中的应用; E-mail: sailingxue@126.com

厉虹(1960—), 女, 教授, 研究方向为高性能电气控制技术; E-mail: lihong8290@163.com

吕志鹏(1984—), 男, 博士, 研究方向为微电网运行与控制。E-mail: dkylzp@126.com

(编辑 许威)