

DOI: 10.7667/PSPC170510

# 梯度因子估计虚拟同步发电机阻尼的配置方法

孔剑虹, 姜学朴, 吴江宁, 徐文

(国网辽宁省电力有限公司大连供电公司, 辽宁 大连 116011)

**摘要:** 针对电网接入分布式发电机时出现的功率振荡问题, 建立了虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)控制的并网逆变器功率控制模型。以功率圆模型推导 VSG 控制的摇摆方程, 引入梯度因子实现了摇摆方程中有功和无功功率的线性独立控制。建立输入输出功率最优二阶阶跃响应模型, 设计出线性独立 VSG 控制摇摆方程阻尼配置方法, 阻尼比取 0.707 时系统的功率振荡恢复到稳定状态的动态响应效果最优。仿真结果表明了所采用的梯度因子和阻尼配置方法的有效性。

**关键词:** 分布式发电机; 功率振荡; 虚拟同步发电机; 梯度因子; 阻尼比

## Damping configuration of the virtual synchronous generator using gradient factor estimation

KONG Jianhong, JIANG Xuepu, WU Jiangning, XU Wen

(Dalian Power Supply Company, State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd, Dalian 116011, China)

**Abstract:** Grid power oscillation occurs when distributed generators connected to grid, the model of grid-connected inverter controlled by Virtual Synchronous Generator (VSG) is established, and its swing equation of VSG control is conducted using power circle model. The process to the linearization and independence of active and reactive power is realized by introducing gradient coefficient. The optimal second-order step response model of input power and output power is established, and the damping configuration method of linear independent VSG control swing equation is designed. When the damping ratio gets 0.707, the dynamic response to power oscillation in low frequency to steady state in the parallel power system gets optimal. The simulation results show that the proposed gradient coefficient and damping configuration are effective.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China Headquarters (No. 080 and No.2015YF-56).

**Key words:** distributed generators; power oscillation; virtual synchronous generator; gradient coefficient; damping configuration

## 0 引言

目前, 分布式发电机主要通过并网逆变器接入电网。与传统同步发电机(Synchronous Generator, SG)相比, 并网逆变器由于缺少惯性特性, 降低了其在并网功率稳定性的作用, 基于虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)的并网逆变器控制策略成为分布式电源并网研究的热点<sup>[1-3]</sup>。

但是由于分布式发电机接入弱电网的非理想性和自身出力的随机性及波动性缺点, VSG 承受功率

波动的能力远不及 SG, 功率振荡还会引起设备参数检测异常, 甚至导致设备运行失稳<sup>[4-5]</sup>。为了提高分布式发电机控制的稳定性, 文献[6]提出了储能单元灵活的虚拟惯性 VSG 解析设计方法, 增加储能平滑功能改善 VSG 在模拟同步发电机运行特性、惯性和阻尼配置的最佳需求, 但是储能配置增加了分布式发电机建设的总投资。文献[7]提出基于小信号模型的自适应虚拟转子惯量的 VSG 控制策略, 确定出惯性系数选取原则, 指出 VSG 满足快速动态响应控制的条件, 但仅考虑角频率变化未涉及功率问题。文献[8]提出了暂态响应下 VSG 的虚拟惯量和阻尼参数调节原则, 运用相轨迹判别稳定性, 该方法明显缩短了系统频率和功率的暂态过程。文献[9]研究

**基金项目:** 国家电网公司总部科技项目(080); 国家电网公司科技项目(2015YF-56)

了微网黑启动过程中 VSG 零升压功能,设计了具有调频调压的 VSG 策略,提升系统同步并列运行的抗扰动能。

上述文献大多从虚拟惯性优化方面提高 VSG 控制的稳定性和灵活性,而针对阻尼参数设计对系统功率振荡的研究不多。为此,本文从简化的动能定理中推导出含阻尼因子的摇摆方程,引入梯度因子  $m$  消除摇摆方程中电压约束分量,实现功率的解耦控制和最优阻尼配方法。最后通过仿真对比,验证了抑制功率振荡的阻尼配置有效性。

### 1 VSG 模型与控制

图 1 为基于 VSG 控制的分布式发电机并网系统。电气部分中,直流母线起稳定输出电压的作用,并网逆变器采用脉冲宽度调制(PWM)调制将直流电压逆变成三相交流电;电感和电容(LC)滤波器用以滤除输出电压高次谐波,提高输出电能质量。公共连接点(PCC)为分布式电源与电网连接处,分布式电源输出的直流电经过一系列整流、逆变和滤波后变成电网电压同频同相同幅值的三相交流电汇入电网。

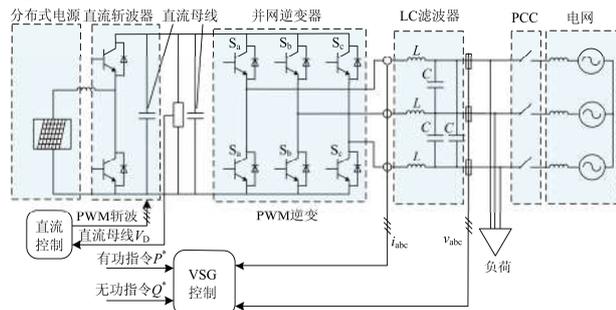


图 1 VSG 控制的分布式发电并网系统

Fig. 1 Diagram of a distributed generator connecting to grid using VSG

图 1 的控制部分采用 VSG 控制。VSG 模型主要是模拟传统同步发电机(SG)的调速器工作原理,表征出有功功率和系统频率之间的下垂特性<sup>[10]</sup>。调速器转子动能如式(1)所示。

$$W = \frac{1}{2} J \omega_m^2 \quad (1)$$

式中:  $J$  为虚拟惯性常量;  $\omega_m$  为虚拟角频率。对式(1)进行微分求导,可获得有功-频率方程,如式(2)所示。

$$P_{in} - P_{out} = J \omega_m \frac{d\omega_m}{dt} - D \Delta \omega_m \quad (2)$$

式中:  $P_{in}$ 、 $P_{out}$  分别为 VSG 输入输出功率;  $D$  为阻尼因子,用以模拟 SG 转子部分的阻尼绕组,  $D \Delta \omega_m$

项模拟转子阻尼作用,此处,  $\Delta \omega_m$  为虚拟角频率  $\omega_m$  和电网额定角频率  $\omega_g$  之差( $\omega_g - \omega_m$ ),  $\omega_g$  可以由换流器中的锁相环(PLL)从电网信号中获取。至此,式(2)可以作为 VSG 结构的摇摆方程。图 2 为 VSG 控制结构图。式(2)用于驱动逆变器 PWM 调制,使得逆变器调制具备了惯性特性。VSG 控制的有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  表达式为<sup>[11]</sup>

$$P + jQ = V_g I^* = \frac{V_i V_g}{X_L} \sin \delta + j \frac{V_i V_g \cos \delta - V_g^2}{X_L} \quad (3)$$

式中:  $I^*$  表示电流有效值的共轭;  $\delta$  为逆变器输出电压  $V_i$  和电网电压  $V_g$  之间的相位差。通过控制逆变器输出电压  $V_i \cos \delta > V_g$ , 则可以实现无功功率的输出。相反,  $V_i \cos \delta < V_g$ , 则逆变器吸收无功功率。可以看出,通过 PI 控制器调节无功输出电压  $Q_{out}$ , 可以获得无功指令  $Q^*$ 。

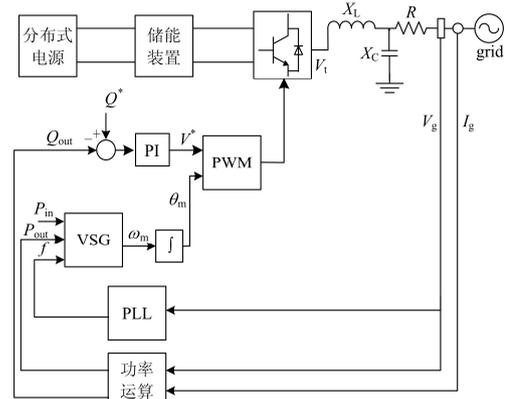


图 2 VSG 控制模型

Fig. 2 Model of VSG controller

### 2 线性化摇摆方程

#### 2.1 摇摆方程

由电力系统分析可知,通过改变功角  $\delta$  可以调节输出有功功率  $P$ , 改变电压幅值  $V_i$  可以调节输出无功功率<sup>[12]</sup>。同步发电机正常运行时功角一般低于  $30^\circ$ , 因此可以假设  $\sin \delta = \delta$ ,  $\cos \delta = 1$ , 此时有功功率  $P$  当作  $\delta$  函数,  $P$  和  $Q$  可实现解耦控制<sup>[13-14]</sup>。图 3 为功角几何关系图。

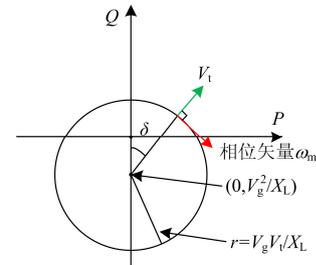


图 3 功率圆控制坐标图

Fig. 3 Coordinate frame of power circle

但若  $\delta$  超出  $30^\circ$  或系统接入电网的线路阻抗较大, 则图 3 的关系不再适用<sup>[5]</sup>。设  $R$  和  $X$  分别为线路电阻和电抗, 式(3)可以改写为式(4)和式(5)。

$$P = \frac{V_t V_g}{\sqrt{R^2 + X^2}} \sin(\delta + \tan^{-1} \frac{R}{X}) - \frac{R V_g^2}{R^2 + X^2} \quad (4)$$

$$Q = \frac{V_t V_g}{\sqrt{R^2 + X^2}} \cos(\delta + \tan^{-1} \frac{R}{X}) - \frac{X V_g^2}{R^2 + X^2} \quad (5)$$

由于有功功率  $P$  包含正弦函数, 因此摇摆方程呈非线性化。同时, 有功和无功功率控制未完全解耦。功率表达式几何关系如图 4 所示。 $\delta$  和  $V_t$  改变  $P$  和  $Q$ , 因此摇摆方程控制关系复杂, 难以实现。

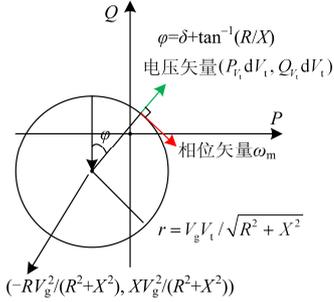


图 4 功率圆控制坐标图

Fig. 4 Coordinate frame of power circle

## 2.2 线性化模型

传统摇摆方程由于耦合关系不能独立控制有功功率和无功功率<sup>[5]</sup>。采用一种不受电网电压幅值  $V_t$  干扰的新型控制策略。设有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  是角  $\delta$  和  $V_t$  二重微分函数, 则关于有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  的微分表达式为

$$dP = P_\delta d\delta + P_{V_t} dV_t \quad (6)$$

$$dQ = Q_\delta d\delta + Q_{V_t} dV_t \quad (7)$$

式中,  $P_{V_t}$  和  $Q_{V_t}$  分别为有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  的微分形式。设定  $P_0$  和  $Q_0$  分别为有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  的初始值, 则  $P$  和  $Q$  的微分形式可描述为

$$P = P_0 + \Delta P = P_0 + \frac{dP}{dt} \Delta t = P_0 + P_\delta \frac{d\delta}{dt} \Delta t + P_{V_t} \frac{dV_t}{dt} \Delta t \quad (8)$$

$$Q = Q_0 + \Delta Q = Q_0 + \frac{dQ}{dt} \Delta t = Q_0 + Q_\delta \frac{d\delta}{dt} \Delta t + Q_{V_t} \frac{dV_t}{dt} \Delta t \quad (9)$$

式中,  $\Delta P$  和  $\Delta Q$  分别为  $P$  和  $Q$  的变化量。将式(8)代入式(2), 并消除  $P_{out}$ , 并将输入功率  $P_{in}$  简写为  $P$ , 则摇摆方程可表示为

$$J \omega_m \frac{d\omega_m}{dt} = (P - P_0 - P_\delta d\delta) - P_{V_t} dV_t + D(\omega_g - \omega_m) \quad (10)$$

式中,  $-P_{V_t} \Delta V_t$  表明电压改变影响功率值, 如果消除该项, 则摇摆方程就能够不受电压改变约束。因此, 引入无功项  $m(Q^* - Q_{out})$ , 其中  $m$  为梯度因子。式(10)可被改写为

$$J \omega_m \frac{d\omega_m}{dt} = (P - P_0 - P_\delta d\delta) + m(Q - Q_0 - Q_\delta \Delta\delta) - (P_{V_t} dV_t + m Q_{V_t} \Delta V_t) + D(\omega_g - \omega_m) \quad (11)$$

若梯度因子  $m = -P_{V_t} / Q_{V_t}$ , 式(11)可以继续化简。

$$\begin{cases} P_{V_t} dV_t + m Q_{V_t} \Delta V_t = P_{V_t} \Delta V_t - \frac{P_{V_t}}{Q_{V_t}} Q_{V_t} \Delta V_t = 0 \\ J \omega_m \frac{d\omega_m}{dt} = (P + mQ) - (P_0 m + Q_0) - (P_\delta d\delta + m Q_\delta \Delta\delta) + D(\omega_g - \omega_m) \end{cases} \quad (12)$$

式(12)表明, 功率分量  $P + mQ$  所在方向与  $\omega_m$  方向重合, 表明该分量垂直于电压矢量  $V_t$ , 相当于 VSG 控制的  $P + mQ$  不受电压偏移的干扰, 而只与角  $\delta$  有关。实现了 VSG 模型的线性化控制。VSG 可以控制总输出功率  $P_{out} + mQ_{out}$  等于总输入功率  $P_{in} + mQ^*$ , PI 控制器可以实现输出无功  $Q_{out}$  无误差地跟踪指令值  $Q^*$ , 因此, 有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  可以稳定地跟踪相应的参考指令值。

## 2.3 梯度因子 $m$ 估计

梯度因子  $m$  在图 4 中相当于  $P_\delta \Delta\delta$  与  $Q_\delta \Delta\delta$  的斜率。当电压幅值和相位变化时, 由于有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  总在一个圆上, 两者功率的改变方向保持正交。因此, 梯度因子  $m$  的表达式为

$$\frac{P_\delta \Delta\delta}{Q_\delta \Delta\delta} = -\frac{P_{V_t} \Delta V_t}{Q_{V_t} \Delta V_t} = \frac{P_\delta}{Q_\delta} = -\frac{P_{V_t}}{Q_{V_t}} = m \quad (13)$$

当相位  $\delta$  不变 ( $\Delta\delta=0$ ) 时,  $\Delta P = P_{V_t} \Delta V_t$ ,  $\Delta Q = Q_{V_t} \Delta V_t$ , 因此, 通过计算  $-\Delta Q / \Delta P$  可以获得  $m$  值。当幅值  $\Delta V_t=0$  不变 ( $\Delta V_t=0$ ) 时,  $\Delta P = P_\delta \Delta\delta$ ,  $\Delta Q = Q_\delta \Delta\delta$ , 因此, 通过计算  $\Delta P / \Delta Q$  可以获得  $m$  值。

VSG 控制通过改变式(2)一式(13)中的有功功率控制方程可以实现电压的独立控制。VSG 控制中, 由于不存在相位检测系统, 相位差  $\delta$  未知。若线路阻抗也未知, 则方程不需要  $\delta$ 、 $R$  和  $X$  参数。

$m$  值估计算法如下。

步骤 1: 设定  $m$  初始值, 仿真环境中一般默认值为 0.1;

步骤 2: 计算控制参数的微分值  $dP/dt$ 、 $dQ/dt$ 、 $d\delta/dt$  和  $dV_t/V_t$ ;

步骤 3: 对比微分值和之前的参考值, 若  $d\delta/dt$

和  $dV_i/V_i$  之间有且只有一个变化, 则执行步骤 4, 反之, 执行步骤 6;

步骤 4: 若  $dP/dt=0$  或  $dQ/dt=0$ , 则  $m$  值不可估计, 执行步骤 6, 反之, 执行步骤 5;

步骤 5: 更新  $m$  值, 若变化, 则  $m=-(dP/dt)/(dQ/dt)$ , 若不变, 则  $m=(dQ/dt)/(dP/dt)$ , 若  $m$  变为正值, 停止更新, 执行步骤 6;

步骤 6: 为了平滑  $m$  值, 采用低通滤波器进行滤波, 然后返回步骤 2。

每次迭代中,  $m$  值根据式(13)进行计算。另外  $m$  值也可从式(6)和式(7)的极限情况计算得出。当  $d\delta/dt=0$  时  $m$  值由式(14)获得, 当  $dV_i/dt=0$  时,  $m$  值由式(15)获得。

$$m = -\frac{P_{V_i}}{Q_{V_i}} = -\frac{\Delta P}{\Delta Q} = \frac{-dP/dt}{dQ/dt} \quad (14)$$

$$m = \frac{Q_\delta}{P_\delta} = \frac{\Delta Q}{\Delta P} = \frac{dQ/dt}{dP/dt} \quad (15)$$

### 3 阻尼配置

为了得到输入功率  $P$  与输出功率  $P_{out}$  之间阻尼配置关系, 对功率方程做如下推导, 将上述功率表达式简写成

$$\begin{aligned} P &= A \sin(\delta + \alpha) - B \\ Q &= A \cos(\delta + \alpha) - C \end{aligned} \quad (16)$$

$$A = \frac{V_i V_{grid}}{\sqrt{R^2 + X^2}}, B = \frac{R V_{grid}^2}{R^2 + X^2}$$

式中:

$$C = \frac{X V_{grid}^2}{R^2 + X^2}, \alpha = \tan^{-1} \frac{R}{X}$$

功率圆中功率分量  $P+mQ$  的同步因子比例关系

$$\frac{P_\delta^2 + Q_\delta^2}{P_\delta^2} = \frac{A^2}{A \cos(\delta + \alpha)} = \frac{A}{\cos(\delta + \alpha)} \quad (17)$$

$\delta$  变化会引起切线方向偏移, 通过将  $P+mQ$  投影到有功功率  $P$  轴上, 同步系数  $P_\delta$  表达式为

$$P_\delta = \frac{A}{\cos(\delta + \alpha)} \cos(\delta + \alpha) = A \quad (18)$$

可以看出,  $P$  的相位偏移和  $P+mQ$  的相位偏移呈三角函数。因此有功功率  $P$  可进一步简化为

$$P_{out} = P_0 + P_\delta \Delta \delta \quad (19)$$

同理, 在初始状态  $\cos(\delta + \alpha) \approx 1$ ,  $P_{out} = P_0 + P_\delta \Delta \delta$  下, 式(11)经过同样投影可以改写为

$$J \omega_m \frac{d\omega_m}{dt} = P - P_{out} + D(\omega_g - \omega_m) \quad (20)$$

当系统稳态运行时,  $J \omega_m$  为常量, 此时若  $\omega_m$  偏移较小, 式(20)可以看作二阶线性微分方程。

将  $\delta = \int (\omega_g - \omega_m) dt$  和  $\omega = 2\pi f$  代入式(21), 可以获得  $P_{out}$  一阶和二阶微分表达式为

$$\begin{cases} \frac{dP_{out}}{dt} = A(\omega_g - \omega_m) \\ \frac{d^2 P_{out}}{dt^2} = A \frac{d\omega_m}{dt} \end{cases} \quad (21)$$

将上式代入式(20), 消去  $\omega_m$ , 在拉式变换下可以推导出  $P_{out}$  和  $P$  之间的表达式

$$P_{out}(s) = P \frac{A/J_m}{[s^2 + (D/J_m)s + A/J_m]s} \quad (22)$$

类比控制理论经典二阶阶跃响应传递函数

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)s},$$

因此可以明显推出阻尼与 VSG 中输入输出功率之间的关系。为了使 VSG 控制功率过程具有二阶阶跃响应衰减特性, 抑制震荡的阻尼因子  $D$  参数应为

$$D = 2\zeta \sqrt{rJ_m} \quad (23)$$

式中:  $r$  为功率圆的半径,  $r = \frac{V_i V_g}{\sqrt{R^2 + X^2}}$ ;  $\zeta$  为阻尼比。利用最优二阶系统理论, 为使得系统动态响应性能最好, 阻尼比  $\zeta$  一般取 0.707。

### 4 验证分析

为了验证所提 VSG 控制的有效性, 在仿真环境中进行了对比研究。光伏阵列输出直流电压为 700 V, 逆变器额定电压、开关频率和额定容量分别为 800 V、10 kHz 和 1 kVA, PWM 调制方式中调制比为 1, LC 滤波器中电感  $L$  为 0.0235 H, 电容  $C$  为 0.000 542 F, 电网电压 400 V。VSG 系统的仿真参数表 1 所示。传统的阻尼控制方法和基于线性化的改进控制方法的仿真结果如下。

表 1 VSG 仿真参数

Table 1 Parameters of the VSG simulation			
参数	数值	参数	数值
额定功率 $P$ /MW	1.5	阻尼因子 $D$	0.05
额定电压 $V$ /kV	10	并网电抗 $X/\Omega$	0.12
惯性常量 $J$ /(kg·m <sup>2</sup> )	62.4	并网电阻 $R/\Omega$	0.04
单位惯性常量 $H/s$	4.5	PI 增益 $k_p/k_i$	0.06/0.001

#### 4.1 无阻尼控制

传统 VSG 控制中无阻尼因子, 为验证有无阻尼区别, 在提出的控制模型中将阻尼因子设为 0。额定有功功率为 1 MW, 无功功率参考值在 1 s 时从 0 变化到 -0.5 Mvar, 运行结果如图 5 所示, 负号表明分布式电源吸收无功功率。

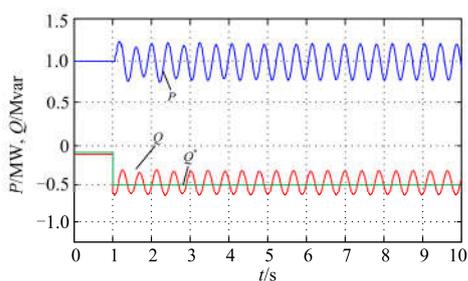


图5 无阻尼因子下VSG控制波形

Fig. 5 Waveforms of VSG control without damping coefficient

从图中可以看出, 当无功功率指令值  $Q^*$  发生突变时, 系统出现功率振荡, 系统有功和无功功率不能够稳定地跟踪参考指令, 干扰了无功和有功功率的精确控制。

#### 4.2 阻尼控制

基于梯度因子变化控制 VSG 阻尼效果。仿真结果如图 6 所示。从图中可以看出, 有功功率变化率  $dP/dt$  或无功功率变化率  $dQ/dt$  持续达到 4 s 时系统停止  $m$  值更新, 系统振荡通过阻尼被有效抑制。 $m$  初始值由  $-0.24$  在 4 s 内更新迭代到  $0.78$ ,  $m$  变化过程平滑, 因此阻尼算法的线性化和功率解耦控制有效抑制了功率振荡。

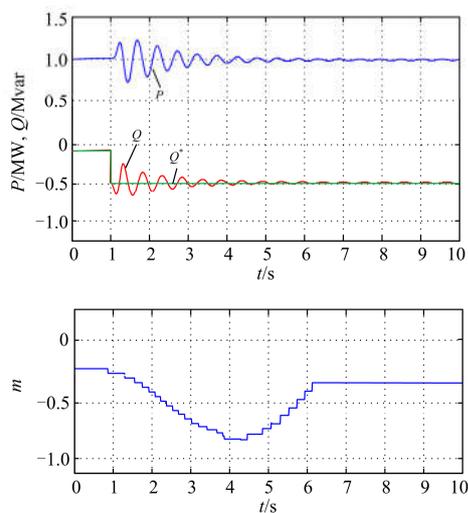
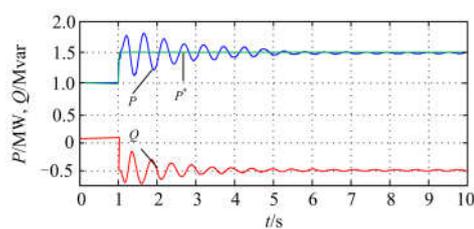
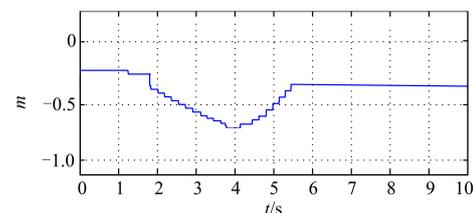
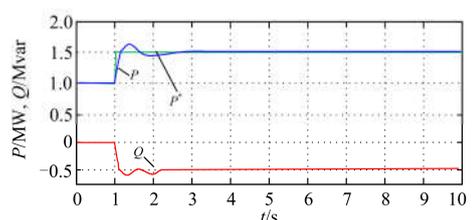
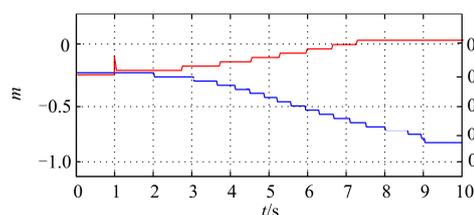
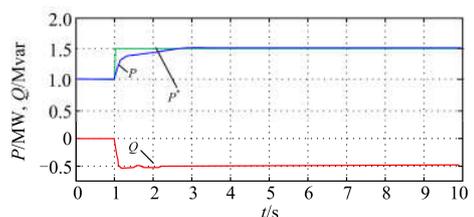


图6 VSG 阻尼控制响应曲线

Fig. 6 Curves of VSG control using damping method

为了验证不同阻尼比  $\zeta$  对系统振荡的影响效果, 令阻尼系数  $D=0.05$ ,  $\zeta$  分别取 0.707 和 1.5 进行比较。 $dP/dt$  和  $dQ/dt$  分别为 0.02 p.u./s 和 0.02 rad/s, 无功  $Q$  为 0 Mvar, 有功功率指令值  $P^*$  从 1 MW 增加到 1.5 MW。功率响应曲线如图 7 所示。 $\zeta > 1$  对应有功功率响应的欠阻尼状态,  $\zeta < 1$  对应有功功率的过阻尼状态。

(a)  $D$  为常数时的功率响应波形(b)  $\zeta=0.707$  时的功率响应波形(c)  $\zeta=1.5$  时的功率响应波形(d)  $\zeta$  变化时的功率响应波形(e)  $\zeta$  变化时的功率响应波形图7  $\zeta$  变化时的功率响应波形Fig. 7 Power response when  $\zeta$  varies

从图中可以看出, 在  $\zeta$  取值不同则系统振荡程度不同。当阻尼因子  $D$  恒定时, 系统振荡逐渐趋于平稳; 而阻尼因子  $D$  自适应变化时, 功率振荡几乎不存在。不同的是, 当  $\zeta=0.707$  时, 系统响应迅速,

功率突变程度降低; 当  $\zeta=1.5$  时, 虽然没有突变现象, 但是系统响应速度变慢。因此  $\zeta=0.707$ , 即  $\zeta$  处于欠阻尼状态最有利于振荡系统快速地恢复到平稳状态。此外, 从图 7(a)—图 7(c)中可以发现, 阻尼作用过程中  $m$  值难以准确估计, 这是由于  $dP/dt$  和  $dQ/dt$  变化率不同引起的, 但是阻尼因子  $D$  的大小和  $m$  值之间变化曲线基本吻合, 这与之前的分析结果相吻合。

## 5 结论

为了解决分布式电源并网下的功率振荡稳定性问题, 推导出了 VSG 控制下输入输出功率定量关系, 引入梯度因子实现了有功和无功功率的独立控制。给出了独立控制模型下的阻尼配置方法, 运用二阶阶跃响应理论得出阻尼比在 0.707 时阻尼振荡过程最优。仿真结果表明了恒定阻尼、过阻尼和欠阻尼三种状态下功率振荡抑制效果不同, 欠阻尼状态最有利于振荡系统快速地恢复到平稳状态。

## 参考文献

- [1] LIU J, MIURA Y, ISE T. Dynamic characteristics and stability comparisons between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 31(5): 1536-1543.
- [2] HIRASE Y, ABE K, NORO O, et al. Stabilization effect of virtual synchronous generators in microgrids with highly penetrated renewable energies[C] // IEEE, Workshop on Control and Modeling for Power Electronics, June 27-30, 2016, Trondheim, Norway: 1-8.
- [3] 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 synchronous generator and its applications in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [4] SHINTAI T, MIURA Y, ISE T. Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 668-676.
- [5] 赵济乾, 赵晋斌, 孙锋. 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): 94-100.  
ZHAO Jiqian, ZHAO Jinbin, SUN Feng. Research on microgrid inverters parallel characteristic based controllable equivalent output impedance[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 94-100.
- [6] 曾正, 邵伟华, 冉立, 等. 虚拟同步发电机的模型及储能单元优化配置[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 22-31.  
ZENG Zheng, SHAO Weihua, RAN Li, et al. Mathematical model and strategic energy storage selection of virtual synchronous generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 22-31.
- [7] 程冲, 杨欢, 曾正, 等. 虚拟同步发电机的转子惯量自适应控制方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 82-89.  
CHENG Chong, YANG Huan, ZENG Zheng, et al. rotor inertia adaptive control method of VSG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 82-89.
- [8] 陈来军, 王任, 郑天文, 等. 基于参数自适应调节的虚拟同步发电机暂态响应优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5724-5731.  
CHEN Laijun, WANG Ren, ZHENG Tianwen, et al. Optimal control of transient response of virtual synchronous generator based on adaptive parameter adjustment[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5724-5731.
- [9] 石荣亮, 张兴, 徐海珍, 等. 基于虚拟同步发电机的多能互补孤立型微网运行控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 32-40.  
SHI Rongliang, ZHANG Xing, XU Haizhen, et al. Operation control strategy for multi-energy complementary isolated microgrid based on virtual synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 32-40.
- [10] 闫俊丽, 彭春华, 陈臣. 基于动态虚拟阻抗的低压微电网下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 1-6.  
YAN Junli, PENG Chunhua, CHEN Chen. Droop control strategy based on dynamic virtual impedance in low-voltage microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 1-6.
- [11] 毛福斌, 张兴, 刘芳, 等. 基于虚拟阻尼补偿的改进型 VSG 控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2016, 50(9): 75-78.  
MAO Fubin, ZHANG Xing, LIU Fang, et al. Research on improved VSG control strategy based on virtual damping compression[J]. Power Electronics, 2016, 50(9): 75-78.

- [12] 刘天琪, 邱晓燕. 电力系统分析理论[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [13] 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.
- [14] ZHAO Y, CHAI J, WANG S, et al. Instantaneous power calculation based on intrinsic frequency of single-phase virtual synchronous generator[J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy, 2017, 5(6): 1-9.
- [15] 蒋文韬, 付立军, 王刚, 等. 直驱永磁风电机组虚拟惯量控制对系统小干扰稳定性影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 33-40.
- JIANG Wentao, FU Lijun, WANG Gang, et al. Impact of direct-drive permanent magnet wind turbines virtual inertia control on power system small signal stability analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 33-40.
- 
- 收稿日期: 2017-04-10; 修回日期: 2017-07-08
- 作者简介:
- 孔剑虹(1963—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 主要研究领域为分布式发电和配电自动化; E-mail: yangchaoneu@sina.com
- 姜学朴(1968—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究领域为配电网信息与通信技术;
- 吴江宁(1972—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究领域为电力系统设备检测, 电力系统运行与管理。
- (编辑 葛艳娜)