

# 虚拟同步发电机参数设计及优化方法

陶亮<sup>1</sup>, 程军照<sup>2</sup>, 王文奎<sup>2</sup>, 宫金武<sup>1</sup>, 孙建军<sup>1</sup>

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 云南电网有限责任公司电网规划研究中心, 云南 昆明 650011)

**摘要:** 为了解决目前虚拟同步发电机技术中没有成套的参数设计方案及其优化方法的问题, 引入钟庆昌教授的 Synchronverters 技术, 提出一套完整的虚拟同步发电机参数设计方法及其优化策略。针对不同参数对系统响应会有不同影响的现象, 应用控制变量法, 分别改变阻尼系数  $D_p$ 、转动惯量  $J$ 、电压下垂系数  $D_Q$  和积分系数  $K$  的值进行仿真和实验。通过对虚拟同步发电机在离网状态和并网同步过程中动态响应的超调量和响应速度的判断和分析, 分别对上述四种参数进行优化, 揭示了时间常数  $\tau_f$  和  $\tau_v$  的物理意义。实验证明: 所提出的设计方法和优化策略能快速而准确地选择出最合适的参数, 具有较好的实用性。

**关键词:** 虚拟同步发电机; 参数设计; 优化策略; 控制变量法; 超调量; 响应速度

## Methods of parameter design and optimization in virtual synchronous generator technology

TAO Liang<sup>1</sup>, CHENG Junzhao<sup>2</sup>, WANG Wenxi<sup>2</sup>, GONG Jinwu<sup>1</sup>, SUN Jianjun<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Grid Planning Research Center, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650011, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that there isn't a set of design method and its optimization strategy in the virtual synchronous generator technology, this paper introduces Professor Qing-Chang Zhong's Synchronverters Technology, and comes up with a complete parameter design method and its optimization strategy of virtual synchronous generator. Because different parameters have different effects on system response, it applies variable control method, changes the value of damping coefficient  $D_p$ , Moment of inertia  $J$ , the voltage dropping coefficient  $D_Q$  and integral coefficient  $K$  respectively and performs simulation experiments. The above four parameters are optimized and the physical meanings of the time constants  $\tau_f$  and  $\tau_v$  are revealed by judging and analyzing the overshoot and response speed of system response when the virtual synchronous generator is in the off-grid state and the grid synchronization process. Experiments show that the proposed design method and optimization strategy can quickly and accurately select the most appropriate parameters with good practicality.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307126).

**Key words:** virtual synchronous generator; parameter design; optimization strategy; variable control method; overshoot; response speed

## 0 引言

在常规的电力系统中, 同步发电机具有调频调压功能<sup>[1-2]</sup>, 系统频率和电压的动态特性是可控的。随着大规模分布式电源通过逆变器接入电网, 由于缺少惯性和阻尼, 导致电网旋转备用容量及转动惯量相对减少, 影响电网稳定性。对于逆变型电源, 若采用适当的并网逆变器控制策略, 使逆变型电源

从外特性上模拟同步发电机的频率及电压调节特性, 将减小分布式发电的不利影响, 提高含高渗透率新能源的电网的稳定性。

就目前逆变型电源虚拟同步发电机技术的研究情况来看, 共分为两大类<sup>[3-7]</sup>: 电压源型虚拟同步发电机技术和电流源型虚拟同步发电机技术。虽然研究成果颇丰, 但是在参数的设计问题上, 很少有文章能够作出详细而准确的阐述。文献[8-10]较为清楚地介绍了虚拟同步发电机的基本原理, 给出了转动惯量  $J$  和积分系数  $K$  的计算公式, 但是对于时间常

数  $\tau_r$  和  $\tau_v$  的物理意义没有作出说明, 对于阻尼系数  $D_p$  和电压下垂系数  $D_Q$  也没有给出相应的计算公式; 文献[11-12]对于虚拟同步发电机的阻尼系数  $D_p$ 、转动惯量  $J$ 、电压下垂系数  $D_Q$  和积分系数  $K$  都给出了详细的计算公式, 但是没有说明时间常数  $\tau_r$  和  $\tau_v$  的物理意义, 也没有分析各个参数对系统动态响应的具体影响。

本文针对目前虚拟同步发电机技术中参数设计缺乏成套方案的问题, 提出一套完整的虚拟同步发电机参数设计方法, 同时运用控制变量法, 分别改变阻尼系数  $D_p$ 、转动惯量  $J$ 、电压下垂系数  $D_Q$  和积分系数  $K$  的值进行仿真实验, 通过系统响应的超调量和响应速度的判断和分析得到参数的优化策略, 实验结果表明该套设计方法具有较好的实用性。

## 1 虚拟同步发电机设计方案

图1表明了逆变型电源与同步发电机的对应关系<sup>[13]</sup>。本文中暂不考虑中性线连接的情况, 如果有需要, 以后再予以研究。根据同步发电机的相关机理, 直流侧是有必要安装储能设备的。原因在于直流母线吸收的功率不仅来自虚拟的原动机, 还来自于惯性在转子上储存的机械能。本文中假设系统储能很大, 直流侧采用理想电压源, 对所提出的控制策略进行分析验证。

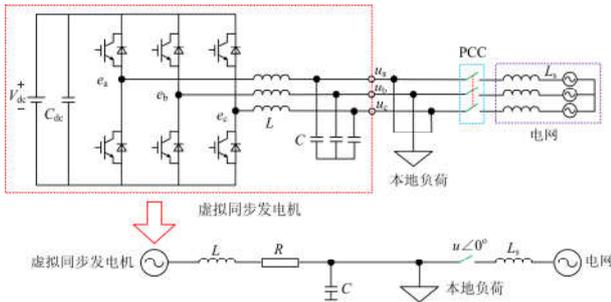


图1 虚拟同步发电机

Fig. 1 Virtual synchronous generator

### 1.1 虚拟同步发电机本体模型

文献[14-16]给出几种较为复杂的同步发电机建模方法, 本文采用文献[8]中提出的较为简单的本体模型构建方案, 在此方案的基础上, 假定该电机为三相隐极式同步发电机, 且极对数为1。根据传统同步发电机的电磁方程和转子运动方程及相关理论, 得到激磁电动势  $e$ 、电磁功率  $T_e$ 、有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  的计算公式, 如式(1)~式(4)所示。同时, 搭建了如图2所示的虚拟同步发电机本体模型。

$$T_e = M_f i_f \langle i, \widetilde{\sin \theta} \rangle \quad (1)$$

$$e = M_f i_f \omega \widetilde{\sin \theta} \quad (2)$$

$$P = M_f i_f \omega \langle i, \widetilde{\sin \theta} \rangle \quad (3)$$

$$Q = -M_f i_f \omega \langle i, \widetilde{\cos \theta} \rangle \quad (4)$$

式中:  $M_f i_f$  为虚拟的转子磁链;  $\omega$  为虚拟的转子角速度;  $i = [i_a \ i_b \ i_c]^T$  为定子侧的电流。

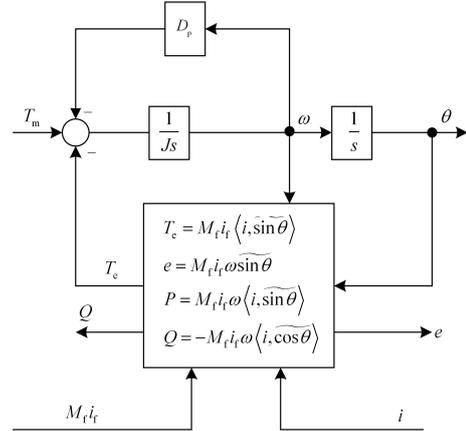


图2 虚拟同步发电机本体模型

Fig. 2 Virtual synchronous generator ontology

### 1.2 虚拟功频控制器设计

传统同步发电机的运行机理中, 当系统负荷发生改变, 功率平衡被打破, 一次调频机制就会起作用, 通过调节原动机的进气/水量, 改变输入的机械功率, 使系统达到新的平衡。式(5)给出了传统同步发电机的 P-f 下垂特性方程。

$$P - P_N = -K_f (f - f_n) \quad (5)$$

式中:  $P$  为有功功率实际值;  $P_N$  为有功功率额定值;  $f$  为系统频率实际值;  $f_n$  为系统频率额定值;  $K_f$  是频率调差系数的倒数。

依照同步发电机转子的运动方程, 借鉴其 P-f 下垂特性方程, 搭建了如图3所示的虚拟功频控制器。通过恰当的控制策略, 让逆变器模拟出同步发电机的惯性和一次调频机制。其中,  $P_{set}$  是给定的有功功率指令值,  $\omega_n$  是额定角速度,  $\omega$  是系统的角速度,  $J$  为虚拟同步发电机的转动惯量。

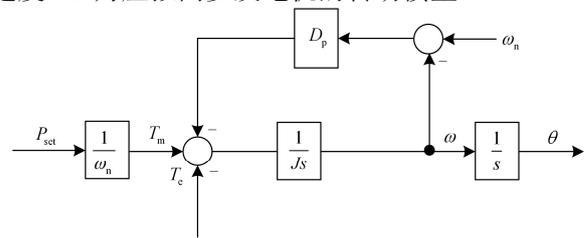


图3 虚拟功频控制器

Fig. 3 Virtual active power and frequency controller

### 1.3 虚拟励磁电压控制器设计

一般情况下,通过调节同步发电机励磁电流的大小改变系统无功量,进而保持系统电压的稳定性。若线路阻抗呈感性,则同步发电机的激磁电动势与励磁电流成线性关系,而当频率不变时,同步发电机端电压与激磁电动势可以看作相等。也就是说,系统无功功率变化时,通过调节同步发电机的励磁电流,改变激磁电动势的大小,使机端电压保持稳定。同步发电机的 Q-U 下垂特性方程为

$$Q - Q_N = -K_U(U - U_N) \quad (6)$$

式中:  $Q$  为无功功率实际值;  $Q_N$  为无功功率额定值;  $U$  为系统电压实际值;  $U_N$  为系统电压额定值;  $K_U$  为电压调差系数的倒数。

借鉴同步发电机的调压特性及 Q-U 下垂特性方程,搭建了如图 4 所示的虚拟励磁电压控制器。通过恰当的控制策略,让逆变器模拟出同步发电机的调压特性。其中,  $Q_{set}$  是给定的无功功率指令值。经过励磁调节和积分环节之后可以得到虚拟的转子磁链  $M_f i_f$ , 转子磁链与系统角速度的乘积就是虚拟激磁电动势的幅值。

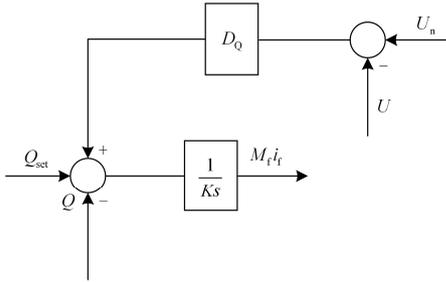


图 4 虚拟励磁电压控制器

Fig. 4 Virtual excitation voltage controller

## 2 虚拟同步发电机参数设计方法

如图 5 所示,是本文中虚拟同步发电机的参数设计及检验的流程。

### 2.1 阻尼系数 $D_p$ 和转动惯量 $J$

对于传统同步发电机,阻尼系数  $D_p$  与转子的机械摩擦有关。本文设计的虚拟同步发电机,  $D_p$  是一个虚拟量,可根据需求设定。一般情况下,先制定虚拟同步发电机的功频性能指标,即根据同步发电机的 P-f 下垂特性方程,确立频率变化与系统有功变化的具体对应关系,也就是先确定频率调差系数的大小,然后根据式(7)计算阻尼系数  $D_p$  的大小<sup>[11]</sup>。综合起来,取值过程中,按照式(8)就可直接得到阻尼系数  $D_p$ 。

$$D_p = \frac{k_f}{2\pi\omega_n} \quad (7)$$

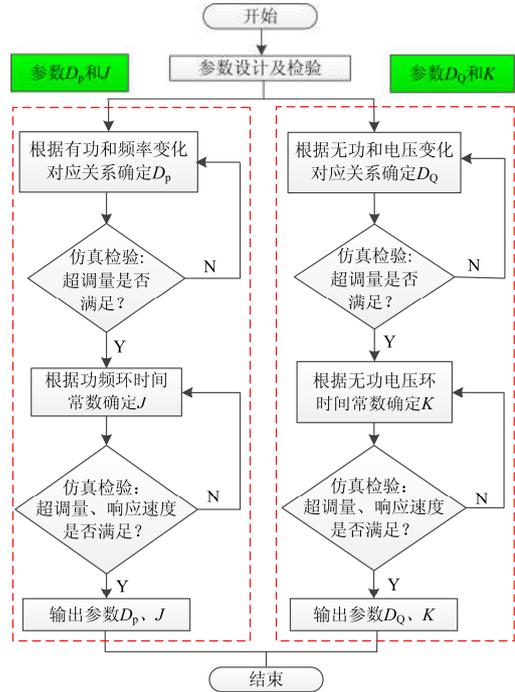


图 5 参数设计及检验流程图

Fig. 5 Flow chart of parameter design and inspection

$$D_p = \frac{\Delta T}{\Delta \omega} = \frac{P_{set}}{2\pi f_n \cdot 2\pi \Delta f} \quad (8)$$

比如额定有功功率  $P_{set}=8\ 000\ \text{W}$ , 如果要求系统频率变化  $\pm 0.5\%$  时系统转矩变化  $100\%$ , 那么阻尼系数  $D_p$  的计算如式(9)。

$$D_p = \frac{P_{set}}{2\pi f_n \cdot 2\pi \Delta f} = \frac{8\ 000}{2\pi \times 50 \times 2\pi \times 0.25} = 16.2 \quad (9)$$

由于本文直流侧采用理想电压源,故转动惯量  $J$  的取值不受储能方面的限制,只与 P-f 调节的时间常数  $\tau_f$  有关,该常数的物理意义后文会具体介绍。

$$J = \tau_f \cdot D_p \quad (10)$$

### 2.2 下垂系数 $D_Q$ 和积分系数 $K$

$D_Q$  为 Q-U 特性的下垂系数,表示无功改变量与电压改变量的比值。 $D_Q$  在实际的取值过程中,根据虚拟同步发电机的电压变化量和无功功率变化量的对应关系,按照式(11)进行计算。

$$D_Q = \frac{\Delta Q}{\Delta V} \quad (11)$$

比如额定无功功率  $Q_{set}=6\ 000\ \text{W}$ , 如果要求系统电压变化  $\pm 10\%$  时系统无功功率变化  $100\%$ , 那么下垂系数  $D_Q$  的计算如式(12)。

$$D_Q = \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{Q}{V \times 10\%} = \frac{6\ 000}{220 \times 10\%} = 272.7 \quad (12)$$

同样地,积分系数  $K$  只与 Q-U 调节的时间常数  $\tau_v$  有关,  $\tau_v$  的物理意义后文再具体介绍。

$$K = \omega_n D_Q \tau_v \quad (13)$$

### 3 仿真与实验

#### 3.1 主电路参数设计

为验证本文所研究的虚拟同步发电机参数设计及优化方法的正确性和有效性, 除了在 Matlab/Simulink 环境中搭建了一台 10 kVA 的 VSG 仿真模型, 同时还在一台 10 kVA 的样机上进行了实验验证, 两者主电路参数都如表 1 所示。其中, 实验系统中直流侧是型号为 62150H-1000 的可调直流电压源, 控制系统采用 EP4CE115F23I7N 和 Stm32f417ZEtB。

表 1 仿真系统参数设计

Table 1 Design of simulation system parameters

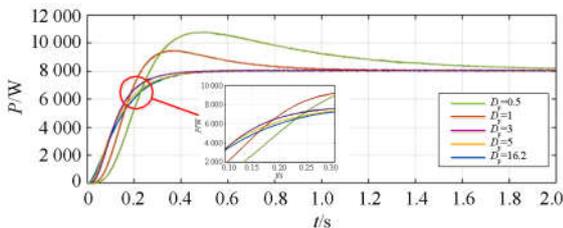
物理量	数值/单位	物理量	数值/单位
直流侧额定电压	800 V	载波频率 $f_c$	5 kHz
交流侧额定电压	三相 380 V	三相滤波电感 $L_1$	2 mH
系统额定频率 $f_n$	50 Hz	三相滤波电感 $L_2$	0.5 mH
系统额定功率	10 kVA	三相滤波电容 $C$	15 $\mu$ F

#### 3.2 离网状态下参数选择对动态响应的影响

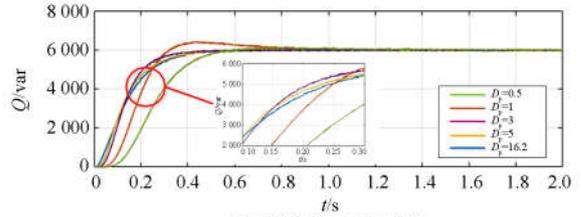
为方便观察和总结不同参数对系统动态响应的影响, 对虚拟同步发电机在离网状态下进行变参数研究。此时有功功率指令为  $P_{set}=8\ 000\text{ W}$ , 无功功率指令为  $Q_{set}=6\ 000\text{ var}$ , 有功负载为  $P=8\ 000\text{ W}$ , 无功负载为  $Q=6\ 000\text{ var}$ 。通过控制变量法, 分别改变阻尼系数  $D_p$ 、转动惯量  $J$ 、电压下垂系数  $D_Q$  和积分系数  $K$  的大小, 旨在研究不同参数对系统动态响应的影响, 由此寻找最优的参数配置。

##### 3.2.1 系数 $D_p$ 和 $J$ 对动态响应的影响

为探究阻尼系数和转动惯量对离网系统动态响应的具体影响, 应用控制变量法, 分别令  $D_p$  取 0.5、1、3、5、16.2,  $J$  取 0.162、0.81、1.62、3.24、6.48, 仿真结果如图 6 和图 7 所示。由仿真结果分析可知: 阻尼系数越小, 响应时振荡频率越大, 系统对冲击的抑制作用越好, 但响应速度越慢; 转动惯量越大, 响应时振荡频率越大, 系统对冲击的抑制作用越好, 响应速度越慢。由式(10)可知, 当阻尼系数一定时, 转动惯量与时间常数  $\tau_r$  成正比。由此揭示  $\tau_r$  的物理意义: 反映了虚拟同步发电机输出功率达到稳定状态的快慢。



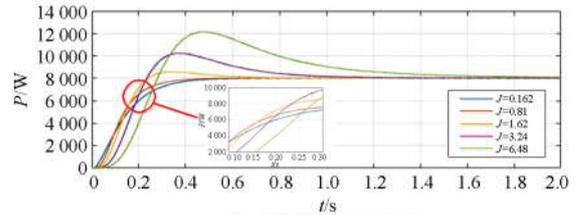
(a) 系统有功功率响应



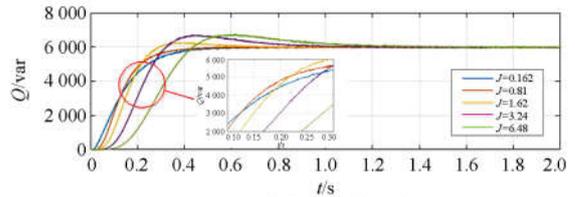
(b) 系统无功功率响应

图 6 不同阻尼系数时系统动态响应

Fig. 6 Dynamic response of the system with different damping coefficients



(a) 系统有功功率响应



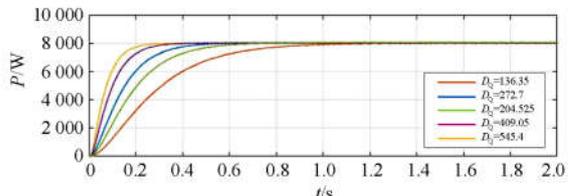
(b) 系统无功功率响应

图 7 不同转动惯量时系统动态响应

Fig. 7 Dynamic response of the system with different moment of inertia

##### 3.2.2 系数 $D_Q$ 和 $K$ 对动态响应的影响

继续探究电压下垂系数和积分系数对离网系统动态响应的影响, 同样的方法, 分别令  $D_Q$  取 136.35、204.525、272.7、409.05、545.4,  $K$  取 34 251.12、85 627.8、171 255.6、256 838.4、342 511.2, 仿真结果如图 8 和图 9 所示。由仿真结果分析可知: 电压下垂系数越小, 响应时振荡频率越大, 系统对冲击的抑制作用越好, 响应速度越慢; 积分系数越大, 响应时振荡频率越大, 系统对冲击的抑制作用越好, 响应速度越慢。由式(13)可知, 当电压下垂系数一定时, 转动惯量与时间常数  $\tau_v$  成正比。由此揭示  $\tau_v$  的物理意义: 反映了虚拟同步发电机输出功率达到稳定状态的快慢。



(a) 系统有功功率响应

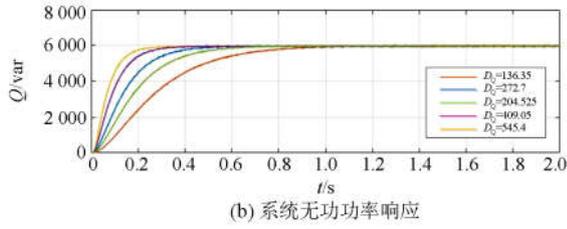


图 8 不同电压下垂系数时系统动态响应

Fig. 8 Dynamic response of the system with different voltage drop coefficients

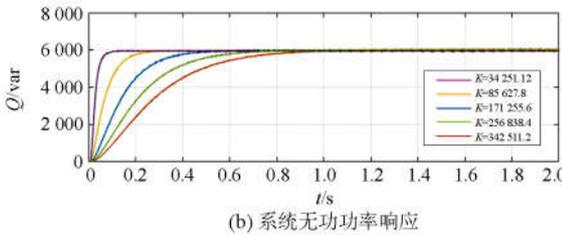
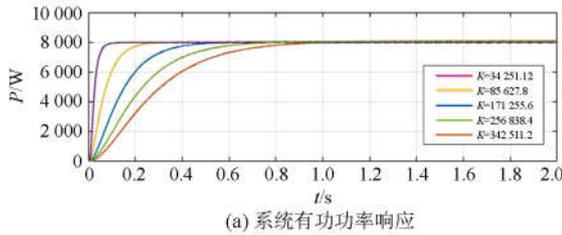
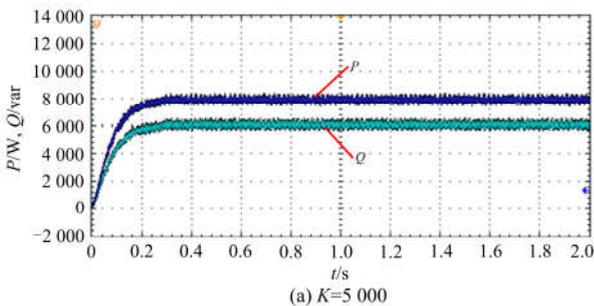


图 9 不同积分系数时系统动态响应

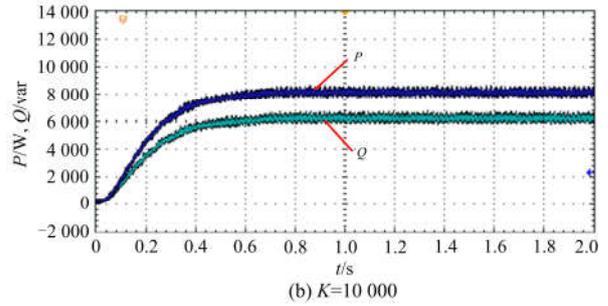
Fig. 9 Dynamic response of the system with different integral coefficients

### 3.2.3 实验分析

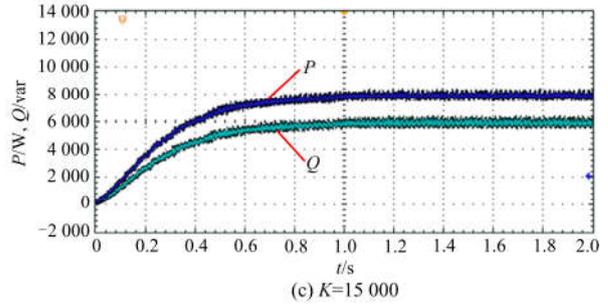
图 10 为积分系数  $K$  分别取值 5 000、10 000、15 000 得到的离网状态下参数选择对系统动态响应影响的实验波形。分析可知，积分系数越小，响应速度越快，响应时振荡频率越小，但系统对冲击的抑制作用越差。其余 3 个参数对该状态下动态响应的影响结果也与 Matlab/Simulink 仿真时相同，由于篇幅限制，就不再一一列举实验波形。



(a)  $K=5\ 000$



(b)  $K=10\ 000$



(c)  $K=15\ 000$

图 10 不同积分系数时系统动态响应

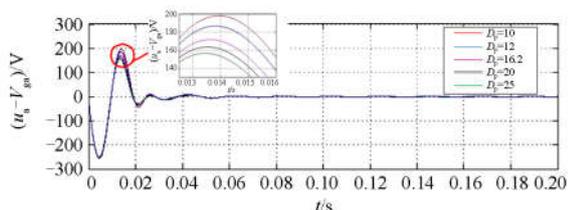
Fig. 10 Dynamic response of the system with different integral coefficients

### 3.3 参数选择对并网同步过程的影响

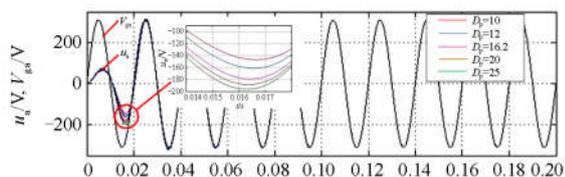
本文采用文献[17-18]中提到的虚拟同步发电机并网策略，不借助锁相环(PLL)并网，控制有功指令和无功指令为 0，计算虚拟电流，使虚拟同步发电机端口电压与电网电压同步，并网同步过程中电压下垂系数  $D_Q$  所在支路并没有参与。通过控制变量法，分别改变阻尼系数  $D_p$ 、转动惯量  $J$  和积分系数  $K$  的大小，旨在研究不同参数对虚拟同步发电机并网同步过程的影响，由此寻找最优的参数配置。

#### 3.3.1 系数 $D_p$ 和 $J$ 对并网同步过程的影响

为探究阻尼系数和转动惯量对虚拟同步发电机并网同步方程的具体影响，应用控制变量法，分别令  $D_p$  取 10、12、16.2、20、25， $J$  取  $3.24 \times 10^{-3}$ 、 $3.6 \times 10^{-3}$ 、 $4.05 \times 10^{-3}$ 、 $4.63 \times 10^{-3}$ 、 $5.4 \times 10^{-3}$ ，仿真结果如图 11 和图 12 所示。由仿真结果分析可知，阻尼系数越小，响应时振荡频率越大，系统对冲击的抑制作用越好，但响应速度越慢，即并网同步过程越慢；转动惯量越大，响应时振荡频率越大，系统对冲击的抑制作用越好，响应速度越慢，即并网同步过程越慢。由式(10)可知，当阻尼系数一定时，转动惯量与时间常数  $\tau_r$  成正比。由此揭示  $\tau_r$  的物理意义：反映了虚拟同步发电机并网同步过程的快慢。



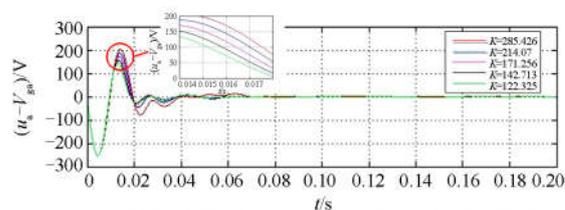
(a) 电网 A 相电压与虚拟同步发电机 A 相端电压偏差



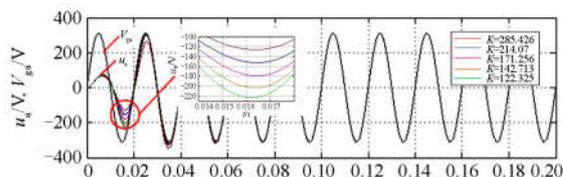
(b) 电压跟踪

图 11 不同阻尼系数时的电网同步过程

Fig. 11 Grid synchronization process with different damping coefficients



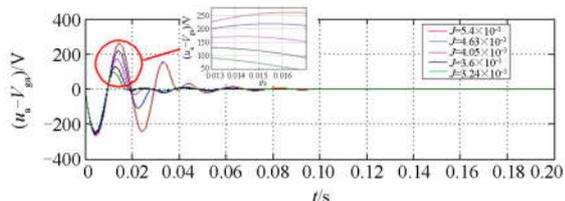
(a) 电网 A 相电压与虚拟同步发电机 A 相端电压偏差



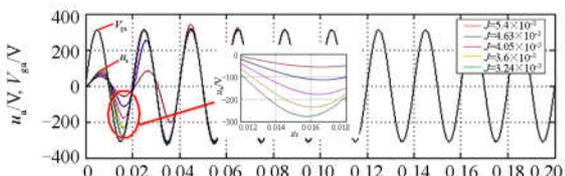
(b) 电压跟踪

图 13 不同积分系数时的电网同步过程

Fig. 13 Grid synchronization process with different integral coefficients



(a) 电网 A 相电压与虚拟同步发电机 A 相端电压偏差



(b) 电压跟踪

图 12 不同转动惯量时的电网同步过程

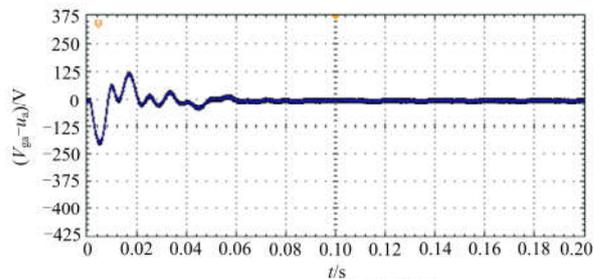
Fig. 12 Grid synchronization process with different moment of inertia

### 3.3.2 系数 K 对并网同步过程的影响

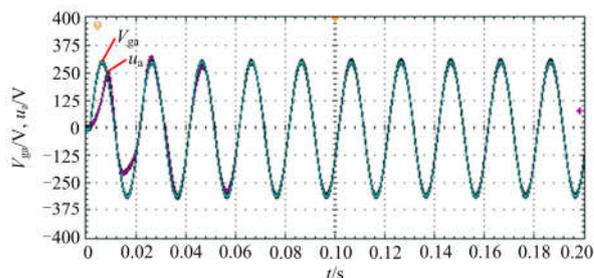
继续探究积分系数对离网系统动态响应的具体影响, 在控制其他参数不变的情况下, 分别令  $K$  取 122.325、142.713、171.256、214.07、285.426, 仿真结果如图 13 所示。由仿真结果分析可知, 积分系数越大, 响应时振荡频率越大, 系统对冲击的抑制作用越好, 响应速度越慢, 即并网同步过程越慢。由式(13)可知, 当电压下垂系数一定时, 转动惯量与时间常数  $\tau_v$  成正比。由此揭示  $\tau_v$  的物理意义: 反映了虚拟同步发电机并网同步过程的快慢。

### 3.3.3 实验分析

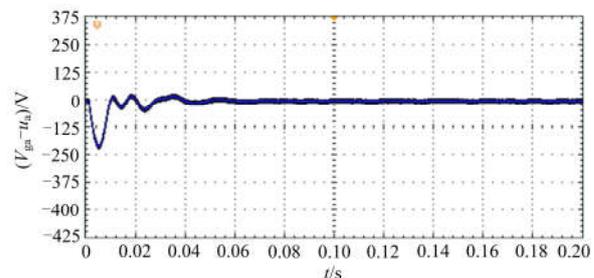
图 14 是积分系数  $K$  分别取值 100、150、200 得到的并网同步过程中参数选择对系统动态响应影响



(a)  $K=100$  时的电压偏差



(a2)  $K=100$  时的电压跟踪



(b)  $K=150$  时的电压偏差

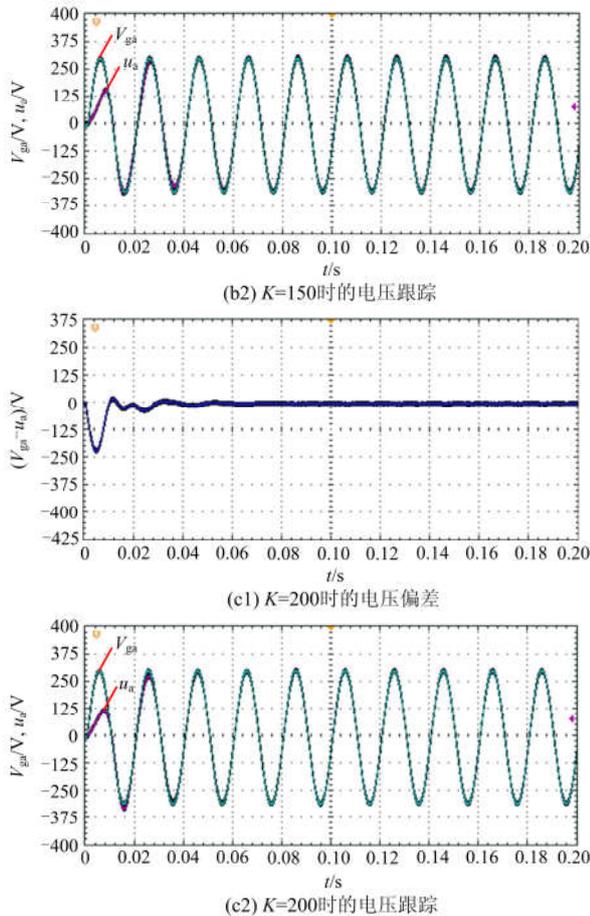


图 14 不同积分系数时的电网同步过程

Fig. 14 Grid synchronization process with different integral coefficients

响的实验波形。经分析可知，积分系数越小，响应速度越快，响应时振荡频率越小，但系统对冲击的抑制作用越差。其余 3 个参数对该状态下动态响应的影响结果也与 Matlab/Simulink 仿真时相同，由于篇幅限制，就不再一一列举实验波形。

#### 4 结论

本文基于虚拟同步发电机技术，提出一套完整的参数设计方法，同时通过控制变量法对参数的选择进行了优化设计，并且进行了仿真验证。得到以下结论：

(1) 阻尼系数  $D_p$  与转动惯量  $J$  对系统动态响应的作用效果相反，电压下垂系数  $D_Q$  与积分系数  $K$  对系统动态响应的作用效果相反。

(2) 设计参数时，先指定系统有功功率变化与频率变化的对应关系来确定阻尼系数  $D_p$ ，再通过改变时间常数  $\tau_i$  得到不同的转动惯量  $J$ ，根据系统容许的超调量和期望的响应速度选择最合适的参数；同

样地，先指定系统无功功率变化与电压变化的对应关系来确定电压下垂系数  $D_Q$ ，再通过改变时间常数  $\tau_v$  得到不同的积分系数  $K$ ，根据系统容许的超调量和期望的响应速度选择最合适的参数。

(3) 虚拟同步发电机在不同状态下参数取值范围应不同：同步过程中转动惯量  $J$  和积分系数  $K$  的值应较小，利于快速实现并网；系统功率变化时，转动惯量  $J$  和积分系数  $K$  的值应较大，可以有效抑制系统的振荡。

#### 参考文献

- [1] 陶骞, 贺颖, 潘杨, 等. 电力系统频率分布特征及改进一次调频控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 133-138.  
TAO Qian, HE Ying, PAN Yang, et al. Characteristics of power system frequency abnormal distribution and improved primary frequency modulation control strategy [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 133-138.
- [2] 金贵阳, 杨克己, 戴永军, 等. 智能配电变压器的串变调压和基于漏磁的绝缘故障检测技术[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 103-108.  
JIN Guiyang, YANG Keji, DAI Yongjun, et al. Voltage regulation and insulation fault detection technology of intelligent distribution transformer[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 103-108.
- [3] 张兴, 朱德斌, 徐海珍. 分布式发电中的虚拟同步发电机技术[J]. 电源学报, 2012(3): 1-6.  
ZHANG Xing, ZHU Debin, XU Haizhen. Virtual synchronous generator technology in distributed generation[J]. Journal of Power Supply, 2012(3): 1-6.
- [4] 彭铖, 刘建华, 潘莉丽. 基于虚拟同步电机原理的微电网逆变器控制及其仿真分析[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(2): 84-88.  
PENG Cheng, LIU Jianhua, PAN Lili. Micro-grid inverter control based on virtual synchronous motor principle and its simulation analysis[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2011, 26(2): 84-88.
- [5] 赵德勇, 吴志清, 胡杨. 基于相电流误差补偿的光伏并网逆变器控制[J]. 电力电子技术, 2015, 49(1): 82-84.  
ZHAO Deyong, WU Zhiqing, HU Yang. Photovoltaic grid-connected inverter control based on phase current error compensation[J]. Power Electronics Technology, 2015, 49(1): 82-84.
- [6] XIAO H, LUO A, BAI L, et al. A deadbeat control method for circulating current between parallel-connected inverters[C] // 2013 1st International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC), November 3-6, 2013,

- Tainan, Taiwan, China: 806-811.
- [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): 89-94.  
DING Ming, YANG Xiangzhen, SU Jianhui. Control strategy of micro-grid inverter based on virtual synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 89-94.
- [8] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [9] BECK H P, HESSE R. Virtual synchronous machine[C] // 2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU), 2007: 1-6.
- [10] MING W L, ZHONG Q C. Synchronverter-based transformerless PV inverters[C] // Industrial Electronics Society, IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE, October 29- November 1, 2014, Dallas, USA: 4396-4401.
- [11] 付柳. 基于虚拟同步发电机的微电网逆变器控制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.  
FU Liu. Research on micro-grid inverter control based on virtual synchronous generator[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [12] WU H, RUAN X, YANG D, et al. Small-signal modeling and parameters design for virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4292-4303.
- [13] 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 application in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [14] 李宗泽, 史成军. 基于二维云模型同步发电机 PID 励磁系统仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 19-24.  
LI Zongze, SHI Chengjun. Simulation of PID excitation system based on two-dimensional cloud model of synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 19-24.
- [15] 赵霞, 周桢钧, 余淦绿, 等. 六相电励磁同步风力发电机组的稳态模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 77-84.  
ZHAO Xia, ZHOU Zhenjun, YU Lülü, et al. Steady-state model of six-phase electro-magnetic synchronous wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 77-84.
- [16] 杨凌霄, 杨松林. 基于观测器的发电机功角和未知输入估计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 128-134.  
YANG Lingxiao, YANG Songlin. Estimation of observer-based generator power angle and unknown input[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 128-134.
- [17] ZHONG Q C, NGUYEN P L, MA Z. Self-synchronized synchronverters: inverters without a dedicated synchronization unit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 617-630.
- [18] ZHONG Q C, MA Z, NGUYEN P L. PWM-controlled rectifiers without the need of an extra synchronisation unit[C] // IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, October 25-28, 2012, Montreal, Canada: 691-695.

收稿日期: 2017-05-25; 修回日期: 2017-06-23

作者简介:

陶亮(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为逆变型电源虚拟同步发电机技术; E-mail: 122593639@qq.com

程军照(1982—), 男, 高级工程师, 研究方向为分布式发电、微网与智能电网技术; E-mail: chenjunzhao@126.com

王文玺(1977—), 男, 高级工程师, 研究方向为新能源与配电网技术。E-mail: wangwenxi@im.yn.csg

(编辑 魏小丽)