

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.D202009

# 基于虚拟同步发电机控制技术的 V2G 系统研究

李德胜<sup>1,2</sup>, 李国策<sup>1,2</sup>, 刘博<sup>1,2</sup>

(1. 国创新新能源汽车智慧能源装备创新中心(江苏)有限公司, 江苏 常州 213000;

2. 万帮数字能源股份有限公司, 江苏 常州 213000)

**摘要:** 随着新能源汽车的普及, V2G(Vehicle-to-Grid)技术受到越来越多的重视。针对电动汽车并入配电网低惯性的特点, 选取虚拟同步发电机控制技术(Virtual Synchronous Generator, VSG)作为控制方案, 结合同步发电机的功角曲线和转动惯量的特性, 提出了一种转动惯量的自适应控制算法。利用有功转子环节功率变化量与频率变化量之间存在一阶惯性的特点, 通过分析转动惯量与此一阶惯性环节时间常数之间存在的关系, 设计了转动惯量的自适应控制算法。并分析了同步发电机的调差系数、阻尼系数与下垂系数之间的关系。最后在 Simulink 仿真平台搭建模型, 验证了所提算法的有效性。

**关键词:** V2G; 虚拟同步发电机; 转动惯量; 自适应算法; 功角曲线

## Research on V2G system based on virtual synchronous generator control technology

LI Desheng<sup>1,2</sup>, LI Guoce<sup>1,2</sup>, LIU Bo<sup>1,2</sup>

(1. National Innovation Energy Vehicle Smart Energy Equipment Innovation Center (Jiangsu) Co., Ltd.,

Changzhou 213000, China; 2. Wanbang Digital Energy Co., Ltd., Changzhou 213000, China)

**Abstract:** As 'new energy' vehicles have become more popular, V2G (Vehicle-to-Grid) technology has received increasing attention. Aiming at the low inertia characteristics of electric vehicles integrated into the switching network, this paper selects Virtual Synchronous Generator (VSG) control technology as a control scheme. Combining the characteristics of the power angle curve and the moment of inertia of synchronous generators, an adaptive virtual synchronous generator (VSG) control algorithm for moment of inertia is proposed. By using the characteristics of first-order inertia between the power variation of the active rotor and the frequency variation, the adaptive control algorithm of the moment of inertia is designed by analyzing the relationship between the moment of inertia and the time constant of the first-order inertia link. The relationship between the adjustment, damping and droop coefficients of the synchronous generator is analyzed. Finally, the model is built on the Simulink simulation platform to verify the effectiveness of the proposed algorithm.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51277056).

**Key words:** V2G; virtual synchronous generator; moment of inertia; adaptive algorithm; power angle curve

## 0 引言

随着国际能源问题的日益突出, 能源安全和环境保护越来越受重视, 以及对于能源安全和化石能源储备的担忧, 促进了电动汽车(Electric Vehicle, EV)数量的快速增长, 同时, 将 EV 应用到 V2G (Vehicle-to-Grid)系统中, 将会产生更大的经济效益和环境保

护效益。对于电网而言, 数量庞大的 EV 可以等效视为灵活的微网系统, 可参与系统的电压和频率的调节<sup>[1-8]</sup>, 在技术层面, V2G 得以实现的核心在于 EV 与电网连接的逆变器及其控制方案。由于电力电子器件多数没有惯性, 所以系统的暂态响应速度快。当系统出现短时间的扰动现象时, 往往希望系统本身能够保持一定的稳定性, 以免对系统造成冲击; 相反当系统扰动消除时, 总是希望系统能够迅速恢复原来的稳定运行状态, 以避免下次发生扰动

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51277056)

时, 系统若处于非稳定运行状态, 可能造成更加严重的损害。

传统的下垂控制中引入“无功调压, 有功调频”的控制方式<sup>[9-10]</sup>, 虽然改善了逆变器的输出特性, 但是在系统有功功率变化时, 系统频率会出现振荡现象。为解决此问题, 以模拟同步发电机惯性和阻尼特性的虚拟同步发电机 (Virtual Synchronous Generator, VSG) 技术应运而生<sup>[11-17]</sup>。文献[18]提出了一种转动惯量自适应控制策略, 能够实现频率超调小的要求, 但未给出控制算法中转动惯量的具体算法。文献[19]提出了一种基于转动惯量的自适应控制策略, 考虑了同步发电机的功角特性, 兼顾了离并网模式下有功和频率超调小的要求, 但是控制方式中存在微分环节, 此环节会造成系统频率振荡。文献[20]结合转动惯量  $J$  对 VSG 输出特性的影响, 提出了一种改进型的转动惯量自适应控制策略, 既能保证动态性能, 又能抑制频率变化过快, 但是控制方式复杂。

针对上述问题, 本文在文献[21-27]的基础上, 研究同步发电机的转子运动方程及其功角特性, 分析了当系统有功功率变化时, 转动惯量对频率响应的影响, 由此, 提出了一种简化的转动惯量自适应控制策略。当系统输出功率变化时, 避免了频率快速变化带来的冲击; 输出功率恢复时, 确保频率快速恢复。在 Matlab/Simulink 搭建模型, 仿真结果验证了所提控制策略的有效性。

### 1 虚拟同步发电机与同步发电机的关系

采用 VSG 控制策略的结构与同步发电机系统存在一定的对应关系, 对应等效关系如图 1 所示。

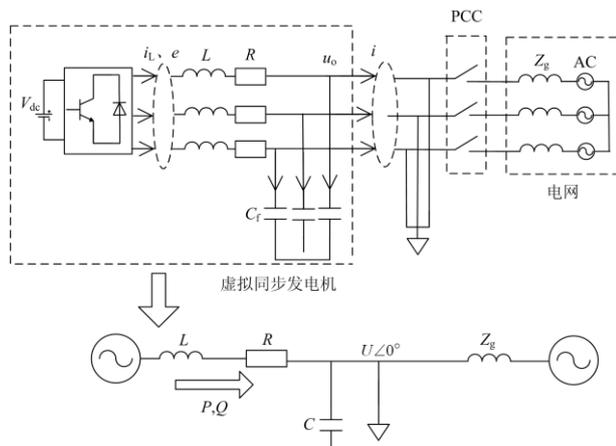


图 1 虚拟同步发电机典型拓扑结构  
Fig. 1 Typical topology of VSG

同步发电机的机械方程为

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D\Delta\omega = \frac{P_m - P_e}{\omega_0} - D\Delta\omega \\ \frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \\ \Delta\omega = \omega - \omega_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $T_m$ 、 $T_e$  分别为机械转矩和电磁转矩;  $P_m$ 、 $P_e$  分别为机械功率和电磁功率;  $J$  为转动惯量;  $D$  为阻尼系数;  $\delta$  为功角;  $\omega$ 、 $\omega_0$  分别为转子角速度和转子额定角速度。

其中虚拟同步发电机的输出有功功率和无功功率如下式所示。

$$\begin{aligned} P_e &= u_{oa}i_a + u_{ob}i_b + u_{oc}i_c \quad (2) \\ Q &= \frac{(u_{oa} - u_{ob})i_a + (u_{ob} - u_{oc})i_b + (u_{oc} - u_{oa})i_c}{\sqrt{3}} \quad (3) \end{aligned}$$

式中:  $u_{oa}$ 、 $u_{ob}$ 、 $u_{oc}$  为同步发电机的输出电压;  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  为输出电流。

由图 1 中可以得到虚拟同步发电机的电磁方程为

$$L \frac{di_{abc}}{dt} = e_{abc} - u_{oabc} - Ri_{abc} \quad (4)$$

式中,  $L$ 、 $R$  分别为虚拟同步发电机的滤波电感和滤波电阻。

#### 1.1 电压控制

VSG 的无功-电压控制方程如式(5)所示。

$$\begin{cases} \Delta Q = Q_{ref} - Q - D_q(V_m - V_{gm}) \\ E = \omega \int \frac{\Delta Q}{K} dt \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $Q$  为系统无功功率;  $Q_{ref}$  为无功功率参考值;  $V_m$  为输出电压幅值;  $V_{gm}$  为电网电压幅值;  $D_q$  为无功下垂系数;  $K$  为转动惯量  $J$  的对偶量,  $K$  的取值大小与系统的响应速度有关, 总的来说,  $K$  值越小, 系统的响应速度越快, 但是当  $K$  值取的太小时, 可能会出现不稳定现象。其选取规则如下:

$$K = \omega_0 D_q \tau_v \quad (6)$$

式中,  $\tau_v$  为电压环的时间常数。由以上可以得到励磁控制框图如图 2 所示。

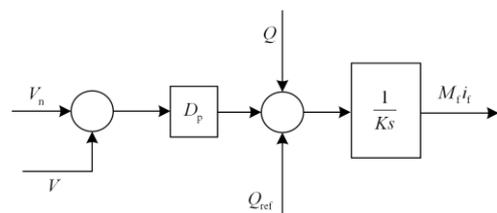


图 2 励磁控制结构图  
Fig. 2 Excitation control structure diagram

## 1.2 频率控制

为了能更加精确地模拟同步发电机的特性, 在虚拟同步发电机中引入了能够模拟有功-频率下垂控制的调速器, 如式(7)所示。

$$P_m = P_{\text{ref}} + K_{\omega}(\omega_0 - \omega) \quad (7)$$

式中:  $P_{\text{ref}}$  为参考有功功率;  $K_{\omega}$  为调差系数。

转子频率特性控制框图如图 3 所示。

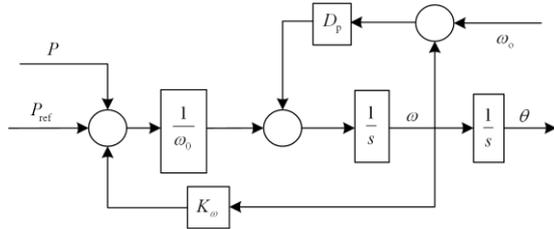


图 3 转子频率特性控制结构图

Fig. 3 Rotor frequency control structure diagram

将式(1)、式(6)在算法中实现, 即可更加准确地模拟同步发电机的转子特性。将上述两式联立求解并做拉普拉斯变换, 可得

$$\frac{\omega - \omega_0}{P_{\text{ref}} - P} = \frac{1}{J\omega_0 s + D\omega_0 + K_{\omega}} \quad (8)$$

式中,  $P$  为 VSG 输出的有功功率。

为便于分析, 将式(7)做变形如式(9)。

$$\begin{cases} \omega_0 \frac{\omega - \omega_0}{P_{\text{ref}} - P} = \frac{1/D_p}{J/D_p s + 1} \\ D_p = D + K_{\omega} / \omega_0 \end{cases} \quad (9)$$

依据以上两个式子可知, 频率环节的时间常数  $T$  和稳态增益  $G$  分别为

$$\begin{cases} T = \frac{J}{D_p} \\ G = \frac{1}{D_p} \end{cases} \quad (10)$$

由此可见阻尼系数和调差系数共同组成了 VSG 的频率下垂系数  $D_p$ ,  $D_p$  和  $J$  共同决定频率环节的时间常数。在稳态时,  $P-\omega$  曲线可近似表述为

$$\omega - \omega_0 = G(P_{\text{ref}} - P) / \omega_0 \quad (11)$$

## 2 基于 V2G 模式的改进型 VSG 控制策略

本节设计一种新的基于 V2G 模式的 VSG 转动惯量控制策略, 提高系统运行的稳定性。

### 2.1 转动惯量对系统的影响

系统的  $P-\delta$  曲线如图 4 所示, 且两者有如式(12)所示的关系。

$$P = \frac{EV}{X_{\Sigma}} \sin(\delta) \quad (12)$$

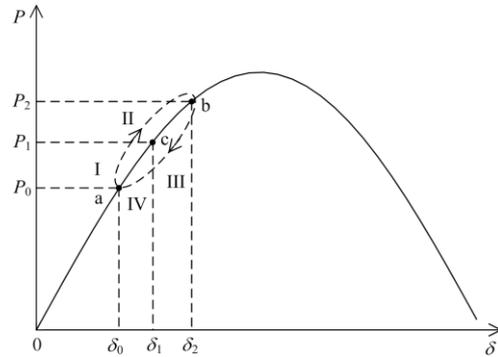


图 4 同步发电机功角曲线和频率振荡曲线

Fig. 4 Synchronous generator power angle curve and frequency oscillation curve

初始系统稳定运行于  $a$  点, 设定功率  $p_0$ , 在此时对应的功角为  $\delta_0$ , 在某时刻改变系统的输出设定值, 设定为  $p_1$ , 此时系统的机械转矩大于电磁转矩, 虚拟转子会开始加速旋转, 并且加速度逐渐减小, 在运行到  $c$  点时, 加速度最小, 速度最大, 由于惯性的关系, 虚拟转子会继续高速旋转, 过  $c$  点后, 机械转矩小于电磁转矩, 因此虚拟转子开始进入减速阶段, 当运动至  $b$  点时, 虚拟转子的转速减至最小, 加速度处于反向最大状态, 此时, 虚拟转子开始进入反向加速阶段, 当运行至  $c$  点后, 进入反向减速阶段, 如此在  $c$  点做往复运动并最终稳定于  $c$  点。由以上的分析可知, 转动惯量的总体控制原则为: 由于在区域 1、3 内虚拟转子做加速运动, 在区域 2、4 内虚拟转子做减速运动, 为了减小系统频率的振荡, 使系统尽快稳定在  $c$  点, 应该控制 1、3 区域内的转动惯量  $J$  增大, 以保证虚拟转子转速不至于过大, 而在 2、4 阶段, 要控制转动惯量  $J$  增大, 以保证虚拟转子转速迅速回落。在达到稳定状态时, 对应的功角为  $\delta_1$ 。

### 2.2 转动惯量自适应控制的改进原理

由以上分析可知, 转动惯量可表示为

$$J = J_0 + k \frac{|\omega - \omega_0|}{\omega - \omega_0} \frac{d\omega}{dt} \quad (13)$$

式中,  $k$  为转动惯量  $J$  关于频率变化率的系数。

由上式可知, 转动惯量关于频率的变化量与频率的变化率有关, 则控制系统中存在着微分环节, 又因为控制系统中的微分环节不易实现, 且微分环节本身具有易造成振荡的性质, 因此, 应考虑其他实现途径。如前文所述式(4), 功率和频率之间存在如式(14)关系。

$$\omega_0 \frac{\Delta\omega}{\Delta P} = \frac{G}{T_s + 1} \quad (14)$$

式中:  $T$  为此环节的时间常数;  $G$  为稳态增益。由一阶系统的性质可知, 在稳态时  $\omega_0 \Delta\omega = G \Delta P$ , 此环节经过约  $4T$  的时间可达到稳态, 因此系统频率的变化率可近似表示为

$$\frac{d\omega}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \approx \frac{\Delta P}{4T} \quad (15)$$

上式表明当功率变化时, 频率达到稳态所需的时间约为  $4T$ 。

发挥电力电子元件的灵活性, 简化转动惯量的控制原则为: 当系统负载变化时, 控制转动惯量增大, 确保延长系统响应时间, 使频率不突变, 不至于引起系统振荡; 当系统负载恢复时, 确保频率迅速恢复, 尽量缩短系统的响应时间, 以降低对系统带来的损害。结合以上分析, 可确定转动惯量的控制算法为

$$J = J_0 + k_0 |P - P_0| \quad (16)$$

结合式(16)和式(8), 得转动惯量的控制框图如图 5。

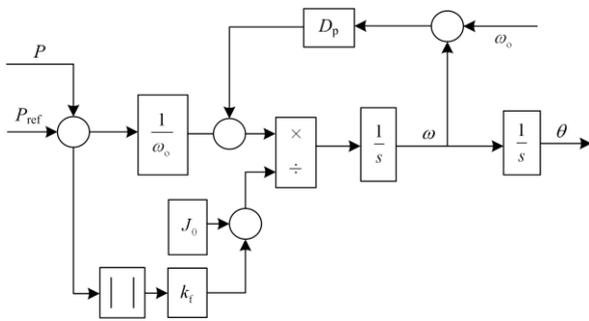


图 5 转动惯量自适应控制结构图

Fig. 5 Moment of inertia adaptive control structure diagram

### 2.3 转动惯量值选取的原则

转动惯量控制下的电动汽车能够为微电网提供电压支撑, 通过调节惯量取值, 可以改变其参与电压支持的程度, 但是当转动惯量取值超出一定值后, 会引起系统不稳定, 应综合考虑选取转动惯量的取

值<sup>[28]</sup>。且在工程上, 转动惯量  $J$  是根据电网频率信息及频率稳定要求确定的。为了尽可能充分地利用微网逆变器的容量, 应选取转动惯量  $J$  为

$$J \leq \frac{P_{\max}}{\max(\omega \frac{d\omega}{dt})} \approx \frac{P_{\max}}{\max(\omega \frac{\Delta P}{4T})} \quad (17)$$

综上所述, 在采用自适应的转动惯量  $J$  时, 考虑到有功功率变化与频率变化之间存在的下垂与惯性特性, 分析了功率与转动惯量之间的关系, 并以此设计出转动惯量的控制策略, 相比式(12)简化了转动惯量控制策略, 并且能够更加快速稳定地到达新的稳态。

### 3 仿真实验

为了验证上述控制策略的有效性及其正确性, 在 Matlab/Simulink 中构建独立的微网仿真模型, 仿真所采用的仿真模型如图 1。其中的参数选取如表 1。

表 1 VSG 控制参数

| Table 1 Control parameters of VSG |                    |
|-----------------------------------|--------------------|
| 主电路参数                             | 数值                 |
| $L/\text{mH}$                     | 1.2                |
| $C/\mu\text{F}$                   | 50                 |
| $J_0/(\text{kg}/\text{m}^3)$      | 0.01               |
| $K_0$                             | $3 \times 10^{-5}$ |

#### 3.1 仿真案例 1: $D$ 对频率响应的影响

设置系统稳定运行时的输出功率为 20 kW, 在 0.15 s 时增加 5 kW 的有功功率, 负载增加 40%, 观察不同下垂系数对频率变化的影响。

按照负载变化 100% 对应频率变化分别为 5%、3.75% 和 2.5% 计算下垂系数。由图 6 可知, 在相同功率变化的条件下, 频率的变化率应分别为 1.2%、0.76% 和 0.56%, 基本符合预先设计, 且系统频率响应重新达到平衡所需要的时间依次减少, 与前文所述基本符合。

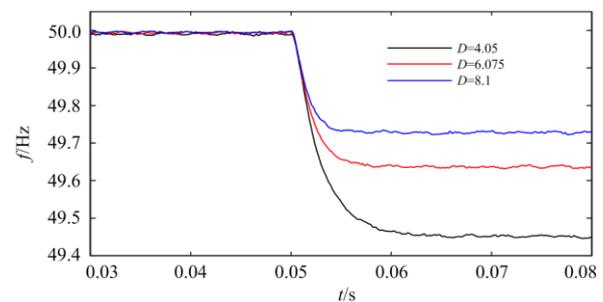


图 6 阻尼系数对频率变化的影响

Fig. 6 Effect of damping coefficient on frequency change

### 3.2 仿真案例 2: $J$ 对频率响应的影响

设置系统稳定运行时的输出功率为 20 kW, 在 0.3 s 时增加 5 kW 的有功功率, 负载增加 40%, 观察不同的  $J$  取值对逆变器输出特性的影响。其中  $D=4.05$ ,  $J$  分别取 0.01、0.05 和 0.1。仿真结果如图 7 所示。

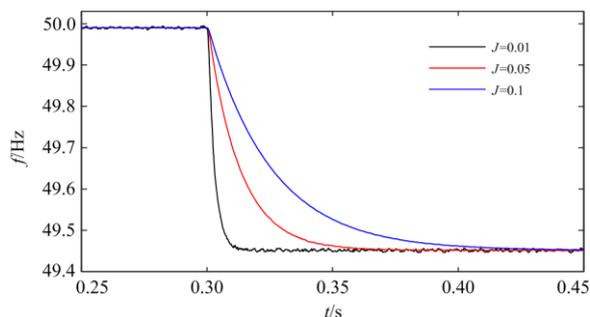


图 7 转动惯量对频率变化的影响

Fig. 7 Effect of moment of inertia on frequency change

由图 7 可以看出, 若转动惯量取值较小, 在系统负载功率发生变化时, 系统频率的稳定时间较短, 这样当发生较大的扰动时, 会对系统的稳定造成一定的破坏; 若转动惯量取值较大, 在系统负载功率变化时, 系统的频率变化缓慢, 保持一定的惯性。

定义  $t$  为频率变化到稳态所需要的实际时间, 由此可知, 在传统控制策略中, 转动惯量的取值与转速环节的时间常数之间的关系如表 2。

表 2 稳定时间与时间常数的对比

Table 2 Comparison of stable time and time constant

| $J/(\text{kg}/\text{m}^3)$ | $J/D$                 | $t/\text{s}$ |
|----------------------------|-----------------------|--------------|
| 0.01                       | $2.46 \times 10^{-3}$ | 0.015        |
| 0.05                       | $12.3 \times 10^{-3}$ | 0.07         |
| 0.1                        | $24.7 \times 10^{-3}$ | 0.15         |

表 2 验证了频率变化达到稳态所需时间与时间常数  $T$  之间存在的正比关系, 证明所设计的简化控制策略的有效性。

### 3.3 仿真案例 3: 自适应算法对频率响应的影响

设置系统稳定运行时的输出功率为 20 kW 在 0.15 s 时增加 5 kW 的有功功率, 负载增加 40%, 在 0.4 s 时负载恢复, 观察转动惯量对系统动态特性的影响。如图 8—图 10 所示。

由图 8、图 9 和图 10 可知, 在转动惯量自适应控制策略下, 当系统负荷发生扰动时, 系统的频率能够保持一定的稳定性, 当负荷扰动消失时, 频率又能够及时恢复至额定状态, 避免下次扰动发生时, 若频率未恢复额定值, 则频率将会在此基础上变化, 有可能造成系统频率严重偏离额定值, 对系统稳定

性造成更大的破坏。

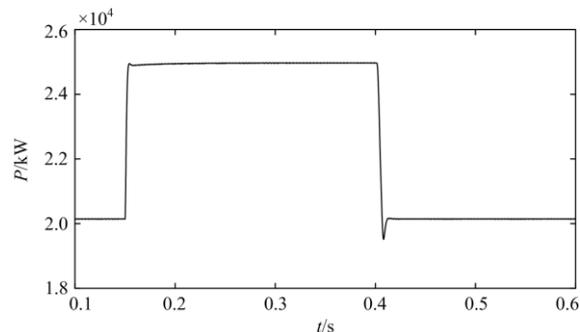


图 8 输出功率变化

Fig. 8 Change of output power

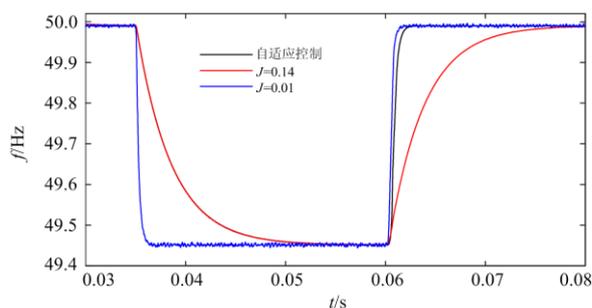


图 9 频率响应

Fig. 9 Frequency response

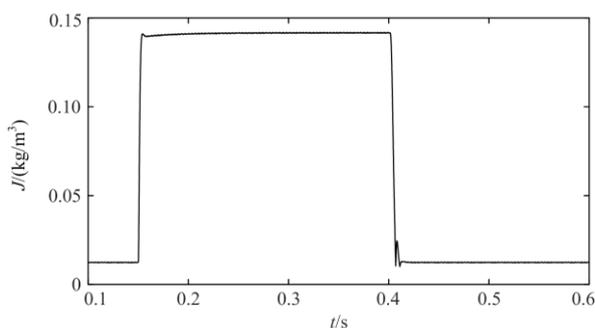


图 10 转动惯量变化

Fig. 10 Change of moment of inertia

## 4 结论

本文提出了一种改善 VSG 输出功率-频率特性的转动惯量自适应控制算法, 该算法根据系统输出功率的变化调节转动惯量, 改善系统频率的动态性能。主要成果分析如下:

1) 所提算法结合同步发电机的功角特性曲线和转动惯量对系统的影响, 分析了转动惯量和频率响应速率的关系;

2) 在 Matlab/Simulink 中搭建了仿真模型, 通过案例分析证明了所提自适应控制算法的有效性, 即

在逆变器输出功率变化时,系统频率变化缓慢,过渡过程长,对系统冲击小;输出功率恢复时,频率立即恢复。

### 参考文献

- [1] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 29-38.  
HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. The impact and utilization of electric vehicles connected to the power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 29-38.
- [2] 何晨颖, 耿天翔, 许晓慧, 等. 利用电动汽车可调度容量辅助电网调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 134-140.  
HE Chenying, GENG Tianxiang, XU Xiaohui, et al. Research on grid frequency regulation using schedulable capacity of electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 134-140.
- [3] 朱小鹏, 卫志农, 颜春椿, 等. 基于虚拟惯性自适应算法的电动汽车控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 134-141.  
ZHU Xiaopeng, WEI Zhinong, YAN Chunchun, et al. Control strategy of electric vehicle based on virtual inertial adaptive algorithms[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 134-141.
- [4] 魏亚龙, 张辉, 孙凯, 等. 基于虚拟功率的虚拟同步发电机预同步方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 124-129.  
WEI Yalong, ZHANG Hui, SUN Kai, et al. Pre-synchronization method of virtual synchronous generator based on virtual power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 124-129.
- [5] 李琳玮, 宁光涛, 俞悦, 等. 基于交通信息的多类型电动汽车综合充电需求研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 191-199.  
LI Linwei, NING Guangtao, YU Yue, et al. Comprehensive charging demand of multi-type electric vehicles based on traffic information[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 191-199.
- [6] 陈仲伟, 欧名勇, 谭玉东, 等. 电动汽车群自组织协调下垂调频控制方法[J]. 电力工程技术, 2019, 38(6): 77-83.  
CHEN Zhongwei, OU Mingyong, TAN Yudong, et al. Self-organized droop frequency regulation method for EV aggregator[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(6): 77-83.
- [7] 张帅, 姚李孝. 配电网对电动汽车可接纳能力分析[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(3): 37-42.  
ZHANG Shuai, YAO Lixiao. Analysis of accommodation capacity of the distribution network for electric vehicles[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(3): 37-42.
- [8] 刘云, 吴家宏. 计及电动汽车渗透率的台区负荷预测研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(1): 72-78.  
LIU Yun, WU Jiahong. Research on forecasting of transformer area load considering the permeability of electric vehicles[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(1): 72-78.
- [9] 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, 23.  
WANG Chengshan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, microgrid and smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14, 23.
- [10] 郑天文, 陈来军, 陈天一, 等. 虚拟同步发电机技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 165-175.  
ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, CHEN Tianyi, et al. Virtual synchronous generator technology and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 165-175.
- [11] GUO Zhiqiang, SHA Deshang, LIAO Xiaozhong. Voltage magnitude and frequency control of three-phase voltagesource inverter for seamless transfer[J]. IET Power Electronics, 2014, 7(1): 200-208.
- [12] ARANI M F M, MOHAMED Y A R I. Analysis and impacts of implementing droop control in DFIG-based wind turbines on microgrid/weak-grid stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 385-396.
- [13] SONIA N, DOOLLA S, CHANDORKAR M C. Improvement of transient response in microgrids using virtual inertia[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1830-1838.
- [14] BECK H P, HESS E R. Virtual synchronous machine[C] // 2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, 2007, Barcelona, Spain.
- [15] 晁凯云, 苗世洪, 刘子文, 等. 基于虚拟同步电机控制的微电网稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 9-16.  
CHAO Kaiyun, MIAO Shihong, LIU Ziwen, et al. Stability analysis of microgrid based on virtual synchronous generator control[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 9-16.
- [16] 付华, 刘公权, 齐晨飞, 等. 计及微电网黑启动的虚拟同步发电机调频策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 59-68.  
FU Hua, LIU Gongquan, QI Chenfei, et al. Frequency regulation strategy of a virtual synchronous generator-based

- microgrid considering the black start process[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(14): 59-68.
- [17] ZHONG Q C. Virtual synchronous machines-a unified interface for smart grid integration[J]. *IEEE Power Electronics Magazine*, 2016, 3(4): 18-27.
- [18] WEI Yalong, ZHANG Hui, SONG Qiong, et al. Control strategy for parallel-operated virtual synchronous generators[C]//2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), 2016, Hefei, China: 2015-2021.
- [19] ZHONG Q C. Power electronics-enabled autonomous power systems: next generation smart grids[M]. New York: Wiley IEEE Press, 2017.
- [20] 张亚楠, 朱淼, 张建文, 等. 基于自适应调节的微源逆变器虚拟同步发电机控制策略[J]. *电源学报*, 2016, 14(3): 11-19.  
ZHANG Yanan, ZHU Miao, ZHANG Jianwen, et al. Control strategy of virtual synchronous generator of micro-source inverter based on adaptive adjustment[J]. *Journal of Power Supply*, 2016, 14(3): 11-19.
- [21] 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 for virtual synchronous generator[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(19): 82-89.
- [22] 宋琼, 张辉, 孙凯, 等. 多微源独立微网中虚拟同步发电机的改进型转动惯量自适应控制[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(2): 412-422.  
SONG Qiong, ZHANG Hui, SUN Kai, et al. Improved moment of inertia adaptive control of virtual synchronous generator in multi-micro source independent microgrid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(2): 412-422.
- [23] ZHANG Y, LIU H, MANTOOTH H A. Control strategy of high power converters with synchronous generator characteristics for PMSG-based wind power application[C]//2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2016, Long Beach, CA, USA: 3180-3184.
- [24] 张玉治, 张辉, 贺大为, 等. 具有同步发电机特性的微电网逆变器控制策略[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(7): 261-267.  
ZHANG Yuzhi, ZHANG Hui, HE Dawei, et al. Microgrid inverter control strategy with synchronous generator characteristics[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(7): 261-267.
- [25] 晁凯云, 苗世洪, 刘子文. 基于虚拟同步电机控制的微电网稳定性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(3): 9-16.  
CHAO Kaiyun, MIAO Shihong, LIU Ziwen. Stability analysis of microgrid based on virtual synchronous generator control[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(3): 9-16.
- [26] 杜威, 姜齐荣, 陈娇瑞. 微电网电源的虚拟惯性频率惯性控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(23): 26-31, 36.  
DU Wei, JIANG Qirong, CHEN Jiaorui. Virtual inertial frequency inertial control strategy for microgrid power supply[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(23): 26-31, 36.
- [27] ANNAMRAJU A, NANDIRAJU S. Coordinated control of conventional power sources and PHEVs using jaya algorithm optimized PID controller for frequency control of a renewable penetrated power system[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, 4(4): 343-355. DOI: doi.org/10.1186/s41601-019-0144-2.
- [28] 朱晓荣, 谢志云, 荆树志. 直流微电网虚拟惯性控制及其稳定性分析[J]. *电网技术*, 2017, 41(12): 3884-3891.  
ZHU Xiaorong, XIE Zhiyun, JING Shuzhi. Virtual inertia control and stability analysis of DC micro-grid[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(12): 3884-3891.

收稿日期: 2020-09-11; 修回日期: 2020-11-30

作者简介:

李德胜(1980—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为电动汽车能源供给装备和系统、电网安全稳定控制技术; E-mail: desheng.li@wbstar.com

李国策(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向新能源发电及其控制; E-mail: G1627567842@163.com

刘博(1992—), 男, 博士, 研究方向为电力电子系统稳定性, 基于电池特性的充电技术等。E-mail: bo2.liu@wbstar.com

(编辑 葛艳娜)