

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180781

基于 ESO 和终端滑模控制的虚拟同步发电机研究

李鑫¹, 康忠健², 常铮³, 赵振东⁴

(中国石油大学(华东)电气工程系, 山东 青岛 266580)

摘要: 微电网是由分布式电源、储能装置和负荷等组成的统一整体, 其在孤网模式下运行时, 主控微源对电压和频率的控制能力对于微电网的稳定至关重要。受电力电子器件固有特点的影响, 微网孤网运行的稳定性较差。为实现主控微源对交流微网的调节作用, 提高交流微电网孤网运行稳定性, 在 DigSILENT 中搭建了光储系统作为主电源的交流微电网。然后依据虚拟同步发电控制技术和非线性鲁棒控制技术对逆变器设计了虚拟同步发电控制器, 在功频控制器中引入扩张状态观测器和终端滑模控制来改善控制性能。通过仿真分析, 虚拟同步发电控制在负荷波动和光伏出力波动时能有效调节微网的电压和频率。通过与一般的控制器仿真结果进行对比, 基于 ESO 和终端滑模控制的虚拟同步发电控制不仅能实现微网调频调压功能, 还能有效提高暂态频率稳定性, 增大交流微网惯性。
关键词: 微电网; 分布式电源; 虚拟同步发电控制; 扩张状态观测器; 终端滑模控制

Research of VSG based on ESO and terminal sliding mode control

LI Xin¹, KANG Zhongjian², CHANG Zheng³, ZHAO Zhendong⁴

(Department of Electrical Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: Microgrid is a unified whole which is composed of distributed power sources, energy storage device and load. Main source control ability of voltage and frequency is crucial to stability of microgrid when it is isolated network running. Due to inherent characteristics of power electronic devices, the stability of microgrid isolated running is poor. In order to realize regulating function of frequency and voltage of the main control source in AC microgrid and improve frequency stability of the AC microgrid operation, a microgrid with solar and storage system as main power supply is built under DigSILENT. Then a VSG controller based on virtual synchronous generation control technology and nonlinear robust control technology is designed to inverter. The Expansion State Observer (ESO) and Terminal Sliding Mode Control (TMSC) are introduced into the power-frequency controller to improve the control performance. Through simulation analysis, VSG controller can effectively regulate the frequency and voltage of microgrid when load or photovoltaic power changes. By comparing with the general controller simulation, the VSG control based on ESO and TMSC can not only realize frequency and voltage regulation of microgrid, but also improve the transient frequency stability more significantly and increase the inertia of AC microgrid.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 60971077).

Key words: microgrid; distributed power; VSG control; ESO; terminal sliding mode control

0 引言

微电网运行方式分为并网和孤网运行, 并网模式下运行时, 由于外部电网的支撑作用, 其运行稳定性相对较高, 而孤网模式下运行时, 没有外部电网支撑, 只有分布式电源和储能电源作为主要供电

电源, 因此主控微源的电压和频率控制能力对于微电网孤网运行的稳定至关重要^[1-2]。含新能源发电的微网在孤网运行时面临诸多问题: 一方面, 新能源发电出力具有间歇性和波动性, 同时, 负载扰动等不可测因素给稳定控制带来一定难度^[3]; 另一方面, 独立微网中没有大电网支撑, 其支撑作用仅仅依靠储能系统, 再加上分布式电源并网变流器固有的特点, 使得微网在孤岛运行时惯性低^[4-5], 电网整体的鲁棒性弱、抗干扰能力差。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(60971077); 中国石化科技计划项目资助(315120)

虚拟同步发电控制在 1976 年被提出,控制原理是在逆变器控制中引入同步电机暂态方程,控制电源侧呈现同步电机特性,从而提高电网惯性。文献[6]介绍了常用虚拟同步发电控制的几种基本结构,并通过小信号模型分析了各种控制结构下的控制性能;文献[7]通过分析虚拟同步发电控制的优势,自主设计了光储联合系统的虚拟同步发电机,通过仿真验证了其提高系统惯性的作用;文献[8]在传统下垂控制策略的基础上,引入自抗扰控制技术,设计了一种基于自抗扰技术的虚拟机无差调频控制策略,并在 PSAD 中与传统 PI 控制效果进行对比,验证了所提控制策略的正确性与有效性;文献[9]详细分析了 VSG 的数学模型和控制策略,设置不同惯性和阻尼参数条件,针对过阻尼、欠阻尼和临界阻尼 3 种情况,提出了 VSG 附加储能单元优化配置的功率、能量和动态响应时间三大指标参数;文献[10-11]通过分析虚拟同步发电机的转子运动方程,提出了虚拟参数自适应的设计方法,其能根据频率偏差量来实时调整虚拟转动惯量和虚拟阻尼系数,并通过仿真验证了其有效性。上述文献对虚拟同步发电控制进行了参数与模型分析、控制器优化设计、储能配置研究及参数设置方法的改进,但是虚拟同步发电控制器采用的数学算法,其实现结构简单,与真实同步电机的功频特性及励磁特性相比,能模拟控制效果,但是控制稳定性仍然存在差异。

在控制工程中,扩张状态观测器不仅能对系统中的状态变量进行有效准确的估计,还能将系统模型的不确定性以及未知外部干扰实时估计出来,因此无需事先给出系统的精确数学模型,并且对于难以确定控制量增益的实际系统,对状态变量也可做出较为精确的实时估计^[12-15]。滑模变结构控制作为非线性控制方法,其最突出的优势是滑动模态的设计与对象参数及扰动无关,其对系统的外部干扰和内部参数摄动具有“完全自适应性”能力。而终端滑模控制在传统滑模控制基础上构造含有非线性项的滑模面实现滑模控制,使系统状态能快速收敛为零,解决了传统滑模控制渐进收敛带来的缺陷,并且由于没有切换项,可以有效消除抖振^[16-21]。

针对上述 VSG 控制研究现状以及 ESO 和终端滑模控制理论,本文从 VSG 功频控制器入手,设计了基于 ESO 和终端滑模控制的虚拟同步发电控制器,并在 DIgSILENT 软件中建立交流微网模型,设计控制器进行了故障仿真,验证了控制方法的有效性。

1 虚拟同步发电控制

虚拟同步发电控制本质上属于电压源型控制方

式,但是不同于传统的电压型下垂控制方法,其通过在逆变器控制中引入虚拟转动惯量和虚拟阻尼系数,模拟同步发电机的暂态特性,能有效提高电网惯性。

光储系统三相电压型逆变器结构如图 1 所示,其中, u_{iabc} 为机端电压, i_{abc} 为定子电流。

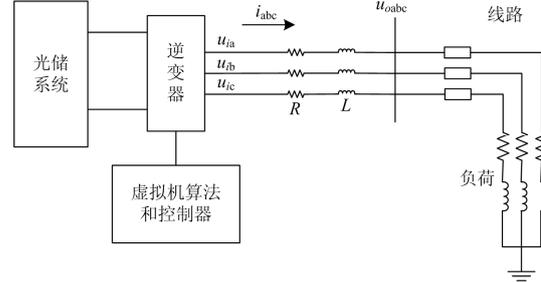


图 1 光储系统三相电压型逆变器结构图

Fig. 1 Structure of 3-phase voltage-source inverter of photovoltaic and storage system

其数学模型方程如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} u_{oa} \\ u_{ob} \\ u_{oc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{ia} \\ u_{ib} \\ u_{ic} \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

dq 坐标系下的方程如式(2)所示。

$$\begin{bmatrix} u_{od} \\ u_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{id} \\ u_{iq} \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega L \begin{bmatrix} -i_q \\ i_d \end{bmatrix} \quad (2)$$

式其, R 、 L 为虚拟机输出电阻和电感。联合虚拟同步发电控制,逆变器控制结构如图 2 所示。

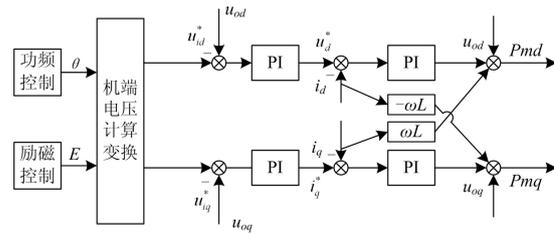


图 2 逆变器控制器

Fig. 2 Controller of inverter

图 2 中的机端电压计算变换即通过同步电机的定子方程 $\dot{U} = \dot{E} - \dot{I}(R_s + jX_s)$, 计算得到机端电压, 其中 \dot{E} 为励磁电势, \dot{I} 为定子电流, R_s 、 X_s 分别为虚拟定子电阻电抗, 机端电压再进行 dq 变换得到机端电压 dq 轴的参考值。控制器中的功频控制器和励磁控制器如图 3 所示。

F_{ref} 为给定频率, F_{meas} 为测量频率, K_p 为调差系数, P_1 、 P_n 为机械功率和测量的有功功率, ω_n 为额定转速, J 和 D 为虚拟转动惯量和虚拟阻尼系数。

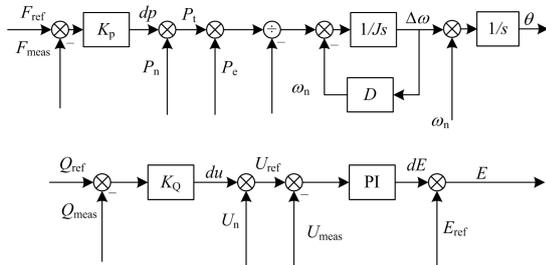


图3 功频控制器和励磁控制器

Fig. 3 Power-frequency controller and excitation controller

功频控制器模拟了同步发电机的调频特性, 其工作原理是检测电网频率, 同给定频率做偏差, 根据频率偏差修正机械功率, 再通过转子运动方程得到励磁电势角度; Q_{ref} 为给定无功功率, Q_{meas} 为测量无功功率, K_Q 为调差系数, U_n 为额定机端电压, E_{ref} 为给定励磁电势。其模拟了同步电机的无功调节和调压功能, 其工作原理是检测外部无功功率的变化, 同给定的无功功率做差, 根据无功偏差修正机端电压的给定值, 再通过端电压偏差修正励磁电势幅值。

2 基于 ESO 的终端滑模控制

非线性系统控制中, 扩张状态观测器可以准确跟踪系统的状态, 并且可以实时估计模型的不确定因素及外部干扰, 通过设计将非线性系统转化为线性系统, 更便于设计控制器。

滑模变结构控制具有算法简单、鲁棒性强等优点, 广泛应用于各种控制系统中。终端滑模控制是普通滑模控制的拓展, 其相比于一般滑模控制, 响应更为迅速。结合扩张状态观测器技术, 可以将两者的优点结合, 应用到虚拟同步发电控制中。

对于一个包含外部干扰的 n 阶时变非线性系统, 其一般表达形式如式(3)所示。

$$\dot{x}^n(t) = f(x(t), \dots, x^{n-1}(t)) + w(t) + bu(t) \quad (3)$$

式中: $x(t), \dots, x^{n-1}(t)$ 为系统的状态变量, 这些量是可测或者间接可测的量; $w(t)$ 是外部干扰信号, 是不确定的量; $u(t)$ 是系统的控制量; b 是控制量的增益系数。

式(3)中, 令 $x_1 = x(t)$, $x_2 = x'(t)$, \dots , $x_n = x^{n-1}(t)$, 则其状态空间表达式可由式(4)进行描述。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \vdots \\ \dot{x}_n = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + w(t) + bu(t) \end{cases} \quad (4)$$

令 $a(t) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + w(t)$, 则由式(4)可得

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \vdots \\ \dot{x}_n = a(t) + bu(t) \end{cases} \quad (5)$$

对于式(5)所描述的系统, 可以对其设计带动态参数补偿的 $n+1$ 阶扩张状态观测器, 如式(6)所示。

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \frac{k_1}{g'(z_1 - x(t))} g(z_1 - x(t)) \\ \dot{z}_2 = z_3 - \frac{k_2}{g'(z_1 - x(t))} g(z_1 - x(t)) \\ \vdots \\ \dot{z}_n = z_{n+1} - \frac{k_n}{g'(z_1 - x(t))} g(z_1 - x(t)) + bu(t) \\ \dot{z}_{n+1} = -\frac{k_{n+1}}{g'(z_1 - x(t))} g(z_1 - x(t)) \end{cases} \quad (6)$$

对于式(5)所描述的系统, 令 $v(t) = a(t) + bu(t)$, 则系统可改写为式(7)所示的伪线性系统。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v(t) \quad (7)$$

对任意 n 阶系统, 可以设计如式(8)所示具有递归结构的全局快速滑动模态。

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = \dot{s}_0 + \alpha s_0 + \beta s_0^{q_0/p_0} \\ \dot{s}_2 = \dot{s}_1 + \alpha_1 s_1 + \beta s_1^{q_1/p_1} \\ \vdots \\ \dot{s}_{n-1} = \dot{s}_{n-2} + \alpha_{n-2} s_{n-2} + \beta s_{n-2}^{q_{n-2}/p_{n-2}} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中, $\alpha_i, \beta_i > 0$, 并且 $q_i, p_i (q_i < p_i)$ 均为正奇数。

令 $\dot{x}_n = f(x) + g(x) \cdot u$, 全局快速滑模控制率可设计为式(9)所示。

$$u(t) = -\frac{1}{g(x)} \times \left(f(x) + \sum_{k=0}^{n-2} \alpha_k s_k^{n-k-1} + \sum_{k=0}^{n-2} \beta_k \frac{d^{n-k-1}}{dt^{n-k-1}} s_k^{q_k/p_k} + \varphi s_{n-1} + r s_{n-1}^{q/p} \right) \quad (9)$$

式中, $g(x) = 1, f(x) = 0$ 。由于各个状态变量和不确定因素可由状态观测器得到, 因此选取滑模面如式(10)所示。

$$s_0 = c_1 z_1 + c_2 z_2 + \cdots + z_n \quad (10)$$

选取快速滑动模态为: $\dot{s}_1 = \dot{s}_0 + \alpha s_0 + \beta s_0^{q_0/p_0}$, 其中 α, β 均大于 0, q_0, p_0 为正奇数并且 $q_0 > p_0$,

由此滑动模态可得控制规律如式(11)所示。

$$v = -c_1 z_2 - c_2 z_3 - \dots - c_{n-1} z_n - \alpha s_0 - \beta s_0^{q_0/p_0} \quad (11)$$

原控制量如式(12)所示。

$$u = \frac{v - z_{n+1}}{b} \quad (12)$$

基于扩张状态观测器的终端滑模控制结构如图4所示。

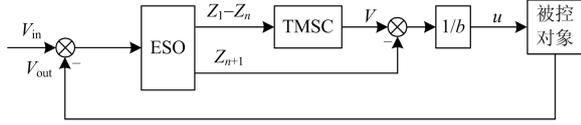


图4 基于 ESO 的终端滑模控制示意图

Fig. 4 Terminal sliding mode control based on ESO

3 基于 ESO 和终端滑模控制的功频控制器设计

3.1 虚拟同步电功频控制器设计

在功频控制器中，功频调差系数实现了频率的一次调节，其为有差调节。为了实现无差调节，针对调差系数，功频控制环节进行重新设计，在调差时引入积分环节，可以消除频率偏差。同时为了引入非线性鲁棒控制，在原先的基础上加入一附加信号，重新设计的控制器如图5所示。

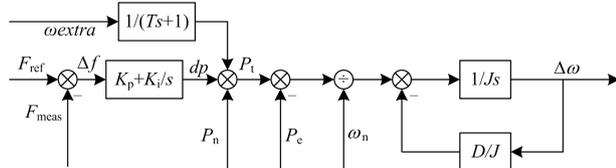


图5 加入附加信号的功频控制器

Fig. 5 Power-frequency controller adding extra signal

加入附加信号 ω_{extra} 后，系统可以写成式(13)所示的标幺值形式。

$$\begin{cases} \dot{\Delta\delta} = \Delta\omega \cdot \omega_0 \\ \dot{\Delta\omega} = \frac{1}{J}(P_t - P_e) - \frac{D}{J} \cdot \Delta\omega \\ P_t = (K_p + K_i/s) \cdot \Delta f + \omega_{extra}/(Ts+1) + P_n \end{cases} \quad (13)$$

令 $dp = (K_p + K_i/s)\Delta f$ ，将其整理为二阶系统如式(14)所示。

$$\Delta\omega = \frac{dp - P_t + P_n}{JT} + \frac{\dot{dp} - \dot{P}_e - D \cdot \dot{\Delta\omega}}{J} + \frac{\omega_{extra}}{JT} \quad (14)$$

$$\text{令 } a(t) = \frac{dp - P_t + P_n}{JT} + \frac{\dot{dp} - \dot{P}_e - D \cdot \dot{\Delta\omega}}{J}, \quad x_1 = \Delta\omega,$$

$b = \frac{1}{JT}$ ， $u(t) = \omega_{extra}$ ，则系统可改写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = a(t) + bu(t) \end{cases} \quad (15)$$

针对上述结构，根据基于 ESO 的终端滑模控制理论即可设计控制器。

3.2 基于 ESO 的终端滑模控制器设计

对于 3.1 节所得到的二阶系统，可以设计三阶扩张状态观测器对状态变量 x_1 、 x_2 以及外部不确定因素进行实时估计，三阶扩张状态观测器如式(16)所示。

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \frac{k_1}{g'(z_1 - x(t))} g(z_1 - x(t)) \\ \dot{z}_2 = z_3 - \frac{k_2}{g'(z_1 - x(t))} g(z_1 - x(t)) + bu(t) \\ \dot{z}_3 = -\frac{k_3}{g'(z_1 - x(t))} g(z_1 - x(t)) \end{cases} \quad (16)$$

式中： z_1 、 z_2 、 z_3 分别是对 x_1 、 x_2 和外部不确定因素 $w(t)$ 的估计值； k_1 、 k_2 、 k_3 是根据“参数动态确定法”得到的参数，可以使得系统状态方程的特征根全部落在复平面的左半平面，从而保证系统在外部干扰下的稳定性； $b = 1/JT$ 是与系统有关的常量； $g(z)$ 函数选取为 $fal(z, \alpha, \delta)$ 函数，其具体表达式如式(17)所示。

$$g(z) = fal(z, \alpha, \delta) = \begin{cases} |z|^\alpha \text{sign}(z), & z \geq \delta \\ \frac{z}{\delta^{1-\alpha}}, & z < \delta \end{cases} \quad (17)$$

式中：取 $\alpha = 0.5$ ； $\delta = 0.001$ 。

根据全局滑模控制器的控制原理，滑模面选取如式(18)所示。

$$s_0 = c_1 z_1 + z_2 \quad (18)$$

构造快速终端滑动模态如式(19)所示。

$$\dot{s}_1 = \dot{s}_0 + \alpha s_0 + \beta s_0^{q_0/p_0} \quad (19)$$

式中， p^0 和 q^0 均为奇数，并且满足 $1 < p^0/q^0 < 2$ ，由此可得

$$u_0 = c_1 z_2 - \alpha s_0 - \beta s_0^{q_0/p_0} \quad (20)$$

最终得到附加修正信号为

$$u(t) = \frac{u_0 - z_3}{b} \quad (21)$$

4 虚拟同步发电控制仿真分析

4.1 仿真电网模型及控制器模型

为验证基于 ESO 的终端滑模控制对虚拟同步

发电控制的改善作用, 本文在 DigSILENT 下建立了含光伏发电的交流微电网模型, 如图 6 所示。其中逆变器参数为: $V_{dc}=1\text{ kV}$, $V_{ac}=0.4\text{ kV}$, 逆变器额定容量 $S=0.5\text{ MVA}$, 光伏系统容量为 0.1 MVA , 储能系统容量足够大, 作为交流电网支撑电源, 满足微网中负荷变化供电需求和夜间供电需求, 通过逆变器控制可实现交流侧的调频与调压。负荷 1—负荷 4 均为静态负荷, 功率均为 0.05 MW , 负荷 5 为动态负荷, 功率为 $0.05\text{ MW}+0.01\text{ Mvar}$ 。

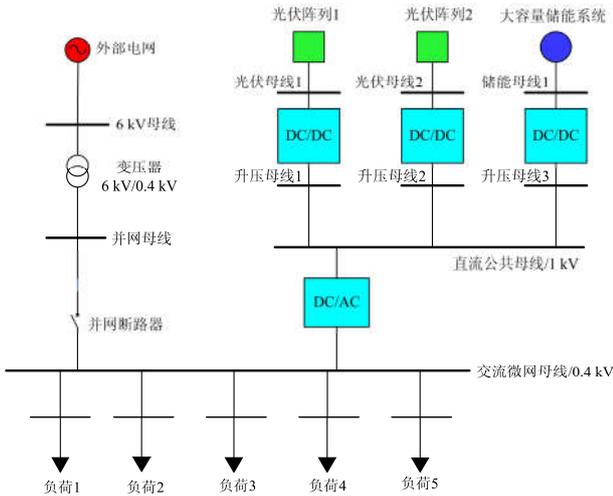


图 6 含光储发电并网的 DigSILENT 微网模型

Fig. 6 Microgrid including photovoltaic and storage system under DigSILENT

在 DigSILENT 中针对光储系统, 设计的虚拟同步发电控制机 Frame 框架如图 7 所示。

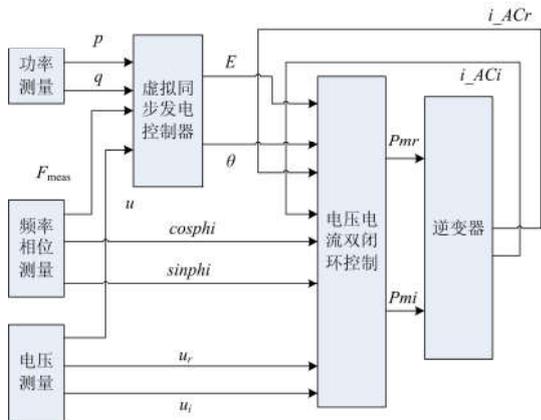


图 7 虚拟同步发电机复合模型

Fig. 7 Composite model of VSG

其中, p 、 q 为测量的有功和无功功率, F_{meas} 、 $\cos\phi_i$ 、 $\sin\phi_i$ 为锁相环测量的频率及相位正弦值和余弦值, u 为测量电压, E 、 θ 为虚拟同步发电控制器输出的励磁电势幅值和角度, P_{mr} 和 P_{mi} 为逆变器调制输入信号。

基于标么值设计的虚拟同步发电功频控制器和励磁控制器结构及参数如图 8 所示。

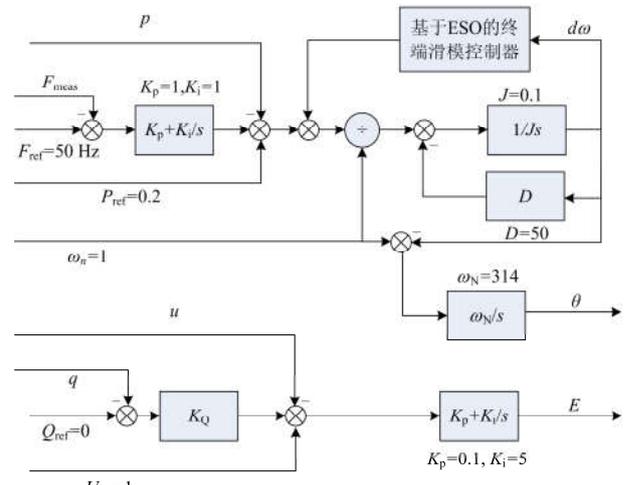


图 8 DigSILENT 功频控制器和励磁控制器

Fig. 8 Power-frequency controller and excitation controller under DigSILENT

其中, 原结构中的 D/J 等效为 D , 电压基准值为 0.4 kV , 功率基准值为 1 MW , 虚拟转速基准值为 314 rad/s , 同频率无差调节类似, 为了实现无差调压, 励磁控制中引入积分环节。

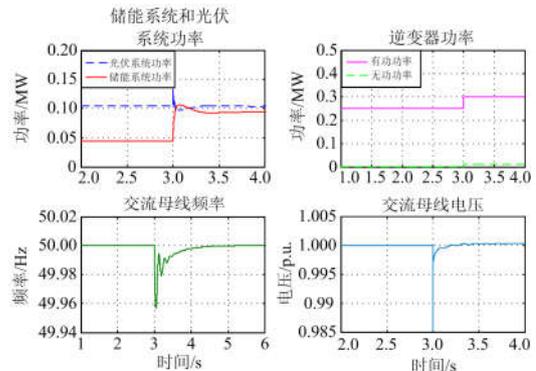
4.2 负荷及光伏出力波动时的 VSG 仿真分析

交流微网处于离网运行模式下, 储能系统作为主控电源, 为验证设计的控制器对电网电压和频率的调节能力, 设置仿真条件如下:

- 1) 3 s 时, 负荷 5 投入运行;
- 2) 3 s 时, 光照强度由 1000 W/m^2 变为 800 W/m^2 , 光伏功率减小, 模拟光伏出力变化。

仿真结果如图 9 所示。

由图 9(a)可以看出, 负荷 5 投入运行后, 有功功率增大, 交流微网电压幅值和频率降低, 但是由于控制器的调频调压作用, 可以迅速调节频率和电压, 并且功频控制器中引入积分作用, 可以实现二次调频, 最终频率恢复到 50 Hz 。



(a)

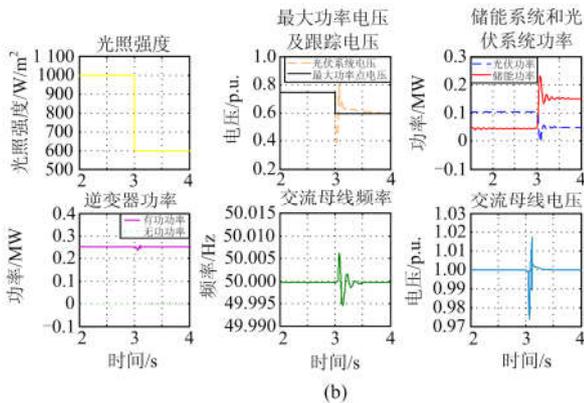


图 9 负荷变化和光伏出力变化仿真波形

Fig. 9 Simulation waveform of load change and photovoltaic output change

由图 9(b)可以看出, 光照强度减弱时, 光伏出力减小, 光伏系统会在最大功率跟踪控制下工作于最大功率点, 受控制器的调节作用, 此时储能系统会增加出力, 最终其出力增加量等于光伏系统功率减少量, 从而抑制了交流侧因电源功率不足引起的电压幅值和频率波动。

4.3 加入 ESO 和终端滑模控制的 VSG 暂态仿真分析

为了提高虚拟同步电机暂态稳定性, 本文在 VSG 控制功频调节环节加入 ESO 和终端滑模控制, 并且同改变虚拟参数进行仿真对比。仿真条件设置如表 1 所示。

表 1 仿真条件设置表

Table 1 Simulation condition setting

| 仿真条件 | 虚拟惯性常数/ kg·m ² | 虚拟阻尼系数 | 非线性鲁棒控制 |
|------|------------------------------|--------|---------|
| 1 | 0.1 | 50 | 无 |
| 2 | 0.1 | 100 | 无 |
| 3 | 0.5 | 50 | 无 |
| 4 | 0.1 | 50 | 有 |

基于 ESO 的终端滑模控制器参数如表 2 所示。

表 2 基于 ESO 的终端滑模控制器参数表

Table 2 Parameters of TMSC based on ESO

| ESO 参数 | | | 终端滑模控制器参数 | | | | | |
|--------|--------|---------|-----------|-------|----------|---------|-----|-----|
| k_1 | k_2 | k_3 | b | c_1 | α | β | p | q |
| 180 | 10 800 | 216 000 | 10 | 500 | 2 | 1 | 9 | 5 |

在 DIqSILENT 中设置仿真参数, 模拟交流电网故障, 故障设置: 线路 1 在 1 s 时发生三相短路故障, 0.1 s 后切除故障。

加入非线性鲁棒控制后的虚拟转速和母线频率仿真结果如图 10 所示。

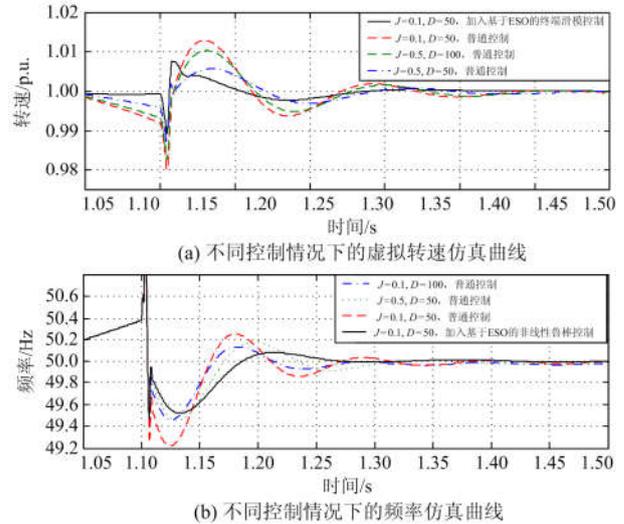


图 10 四种仿真条件下的虚拟转速和频率曲线

Fig. 10 Virtual speed and frequency waves under four simulation conditions

取频率误差达到 0.05 Hz 时为恢复时间, 故障切除后交流母线的最大频率和频率恢复时间如表 3 所示。

表 3 故障切除后交流母线频率最大值与恢复时间表

Table 3 Maximum frequency of AC bus and recovery time after clearing fault

| 仿真条件 | 最大频率/Hz | 恢复时间/s |
|------------------------|---------|--------|
| $J=0.1, D=50$, 无鲁棒控制 | 50.257 | 0.162 |
| $J=0.5, D=50$, 无鲁棒控制 | 50.179 | 0.158 |
| $J=0.1, D=100$, 无鲁棒控制 | 50.132 | 0.155 |
| $J=0.1, D=50$, 有鲁棒控制 | 50.075 | 0.137 |

由仿真结果可以看出, 当光储系统离网运行发生扰动时, 相同的虚拟转动惯量下, 适当增大阻尼系数, 有利于提高离网运行频率的稳定性; 在相同的阻尼系数下, 适当增大转动惯量, 也会减小频率波动。

虽然增大虚拟转动惯量和虚拟阻尼系数可以提高频率稳定性, 但是对于虚拟转动惯量而言, 并不是任意增大就可以提高频率稳定性。当 J 值过小, 将不利于虚拟机抗干扰能力, 外部干扰时频率波动大; 当 J 值过大, 频率变化虽然缓慢, 但是其调节速度变慢, 动态调节时间加长, 通常情况下需要对虚拟参数进行优化选择。因此, 针对上述情况, 可以利用非线性鲁棒控制对功频控制器进行设计, 来削弱虚拟参数设置不合理带来的影响。

由对比结果可以看出, 在虚拟同步发电功频控制环节加入基于 ESO 的终端滑模控制器后, 可以有效提高虚拟同步发电控制的鲁棒性, 改善其控制性能, 对于微电网而言, 其能提高微网孤网运行下的

频率稳定性, 增大微网惯性。

5 结论

虚拟同步发电技术赋予新能源发电系统同步电机特性, 能有效提高新能源发电离网运行的稳定性, 但是其控制效果受虚拟参数的影响较大, 参数设置需要兼顾多方面性能的影响。本文基于虚拟同步发电控制技术, 在 DIGSILENT 中搭建含光储发电系统的微电网模型, 在离网运行模式下对逆变器设计虚拟同步发电控制器, 并对其中的功频控制环节加入 ESO 和终端滑模控制, 通过仿真分析, 可以得出以下结论:

1) 虚拟同步发电控制的控制效果受虚拟参数的影响, 当虚拟转动惯量和虚拟阻尼系数在一定范围内增大时, 均能够改善其控制效果, 提高电网频率稳定性;

2) 当虚拟同步发电控制中加入 ESO 和终端滑模控制后, 效果类似于增大虚拟转动惯量和虚拟阻尼系数, 能够有效提高系统的鲁棒性, 并且相比于改变虚拟参数, 其效果更好, 因此可以削弱参数设置不合理带来的不利影响。

简单的滑模控制优化中, 参数设置以及滑模面的选取对其性能影响很大, 滑动模态的设计及参数调节过程可能比较复杂。而扩张状态观测器预先对状态变量、不确定因素和外部扰动进行实时估计, 将虚拟同步机系统内部的变化及外部扰动实时估计出来, 并在控制器中对其进行动态补偿。基于 ESO 的终端滑模控制引入到虚拟同步发电控制中, 具有较高的应用价值。

参考文献

- [1] 苏剑. 分布式电源与微电网并网技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [2] 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 microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [3] 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.
- [4] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Summary of microgrid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [5] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 3 版. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [6] 林岩, 张建成, 孟建辉. 分布式发电虚拟同步发电机控制策略分析与比较[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2017, 44(1): 16-23.
LIN Yan, ZHANG Jiancheng, MENG Jianhui. Analysis and comparison of virtual synchronous generator control strategy for distributed generation[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2017, 44(1): 16-23.
- [7] 石荣亮, 张兴, 刘芳, 等. 虚拟同步发电机在光储柴独立微电网中的控制研究[J]. 电气与能效管理技术, 2017(3): 26-33.
SHI Rongliang, ZHANG Xing, LIU Fang, et al. Virtual synchronous generator control in autonomous photovoltaic-battery-diesel micro grids[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(3): 26-33.
- [8] 孟建辉, 王毅, 石新春, 等. 基于虚拟同步发电机的分布式逆变电源控制策略及参数分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 1-10.
MENG Jianhui, WANG Yi, SHI Xinchun, et al. Control strategy and parameter analysis of distributed inverters based on VSG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 1-10.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 李东东, 朱钱维, 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]. 电力系统自动化, 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]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 37(11): 72-77.
- [12] LIU Huixian, LI Shihua. Speed control for PMSM servo system using predictive functional control and extended state observer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 1171-1183.
- [13] 刘静, 黄磊, 康忠健. 基于自抗扰控制技术的双馈型感应发电机功率解耦控制[J]. 电机与控制应用, 2012, 39(1): 57-61.
LIU Jing, HUANG Lei, KANG Zhongjian. Decoupling control of power in double-fed induction generator based on auto-disturbance rejection control technology[J]. Electric Machines & Control Application, 2012, 39(1): 57-61.
- [14] 刘安东, 张荣超, 俞立, 等. 基于扩张状态观测器的分散模型预测控制[J]. 控制与决策, 2016, 31(6): 1093-1098.
LIU Andong, ZHANG Rongchao, YU Li, et al. Extended state observer-based decentralized model predictive control[J]. Control and Decision, 2016, 31(6): 1093-1098.
- [15] 吴爱华, 赵不贿, 茅靖峰, 等. 基于转矩观测器的垂直轴风力发电最大功率跟踪反演控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 7-13.
WU Aihua, ZHAO Buhui, MAO Jingfeng, et al. Back-stepping control for vertical axis wind power generation system maximum power point tracking based on torque observer[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 7-13.
- [16] 李林, 宋宗勋, 李峰, 等. 抑制区域间低频振荡的UPFC模糊滑模控制器[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 104-109.
LI Lin, SONG Zongxun, LI Feng, et al. UPFC fuzzy sliding mode controller for damping inter-area low frequency oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 104-109.
- [17] ZAIDI A, DAHECH K, DAMAK T, et al. Maximum power point tracking of photovoltaic systems based on fast terminal sliding mode controller[J]. International Journal of Renewable Energy Research, 2016, 6(4): 1435-1445.
- [18] 徐世许. 不确定系统的终端滑模变结构控制[D]. 上海: 复旦大学, 2012.
XU Shixu. Terminal sliding mode variable structure control for uncertain systems[D]. Shanghai: Fudan University, 2012.
- [19] DASH P K, PATNAIK R K, MISHRA S P. Adaptive fractional integral terminal sliding mode power control of UPFC in DFIG wind farm penetrated multimachine power system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 79-92. DOI: 10.1186/s41601-018-0079-z.
- [20] 赵越, 刘斌. 基于滑模变结构控制的永磁同步电机矢量控制[J]. 微电机, 2016, 49(11): 76-80.
ZHAO Yue, LIU Bin. PMSM vector control based on sliding mode variable structure control[J]. Micro Motor, 2016, 49(11): 76-80.
- [21] 康忠健, 陈醒, 崔朝丽, 等. 基于ESO与终端滑模控制的直流配电网母线电压控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 1-8.
KANG Zhongjian, CHEN Xing, CUI Zhaoli, et al. Bus voltage control method of DC distribution network based on ESO and terminal sliding mode control[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 1-8.

收稿日期: 2018-06-28; 修回日期: 2018-07-26

作者简介:

李鑫(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: 776195855@qq.com

康忠健(1971—), 男, 博士, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制、电能质量分析与控制。E-mail: Kangzjzh@163.com

(编辑 许威)