

引用格式:杨旭红,金宏艳,刘众鑫,等.光储逆变器的虚拟同步机自适应控制策略研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(2):181-189.

Citation: YANG Xuhong, JIN Hongyan, LIU Zhongxin, et al. Research on adaptive control strategy of virtual synchronous machine applied for the photovoltaic and energy storage inverter[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 181-189.

# 光储逆变器的虚拟同步机自适应控制策略研究

杨旭红<sup>1</sup>, 金宏艳<sup>1</sup>, 刘众鑫<sup>2</sup>, 潘宇<sup>2</sup>, 贾巍<sup>3</sup>

(1.上海电力大学自动化工程学院, 上海 200090; 2.上海空间电源研究所/空间电源技术国家重点实验室, 上海 200245;

3.上海太阳能工程技术研究中心, 上海 200241)

**摘要:**针对具有固定转动惯量的常规光伏储能虚拟同步发电机并网发电系统容易出现功率振荡以及频率超调等问题,提出光储并网系统的虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)自适应控制策略。首先,搭建虚拟同步发电机控制的光伏储能并网发电系统模型,系统前级采用光伏最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MTTP)控制以及储能控制策略;然后,根据功角特性和转子角频率特性曲线分析转动惯量对 VSG 动态特性的影响,将 RBF 神经网络应用到 VSG 中,对转动惯量进行自适应调整,同时,在固定阻尼比的基础上,随着转动惯量的变化自适应调整阻尼系数;在 MATLAB/SIMULINK 上建立光储并网系统的 VSG 自适应控制仿真模型,验证此控制策略的可行性;最后,将自适应转动惯量阻尼控制策略与其他控制策略进行对比,仿真结果表明:采用此控制策略能够使光储并网系统的有功功率振荡得到抑制,改善转子角频率超调。

**关键词:**光储微网;虚拟同步发电机;转动惯量;阻尼;自适应控制

**DOI:** 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.02.020 **中图分类号:** TM464 **文章编号:** 1673-9140(2024)02-0181-09

## Research on adaptive control strategy of virtual synchronous machine applied for the photovoltaic and energy storage inverter

YANG Xuhong<sup>1</sup>, JIN Hongyan<sup>1</sup>, LIU Zhongxin<sup>2</sup>, PAN Yu<sup>2</sup>, JIA Wei<sup>3</sup>

(1.College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2.Shanghai Institute of Space

Power-Sources/State Key Laboratory of Space Power-Sources Technology, Shanghai 200245, China; 3.Shanghai Solar

Energy Engineering Technology Research Center, Shanghai 200241, China)

**Abstract:** To address issues such as power oscillation and frequency overshoot in the grid-connected photovoltaic and energy storage system operating at virtual synchronous generator (VSG) mode that has fixed rotational inertia, an adaptive control strategy for VSG in the grid-connected photovoltaic and energy storage system is proposed. Firstly, a model of the grid-connected power generation system which on basis of VSG control and containing photovoltaic and energy storage is established. The front stage of the grid-connected power generation system adopts photovoltaic MTTP control and energy storage control. Then, the influence of rotational inertia on the dynamic characteristics of VSG is analyzed according to characteristic curves of the power angle and the rotor angular frequency. The RBF neural network is applied to the VSG to adaptively adjust the rotational inertia. Simultaneously, based on a fixed damping ratio, the damping coefficient is adaptively adjusted as the rotational inertia changes. A simulation model about the adaptive control of VSG for the grid-connected photovoltaic and energy storage system is built in MATLAB/SIMULINK to verify the feasibility of this control strategy. Finally, a comparison between the adaptive damping control strategy for rotational inertia and other control strategies is conducted. Simulation results demonstrate that this control strategy can suppress active power oscillations in the grid-connected photovoltaic and energy storage system and improve rotor angular

收稿日期:2022-09-17;修回日期:2023-04-20

基金项目:国家自然科学基金(51777120);上海市 2021 年度“科技创新行动计划”科技支撑碳达峰碳中和专项(第一批)(21DZ1207502)

通信作者:杨旭红(1969—),女,博士,教授,主要从事智能电网控制技术、新能源发电及储能技术、火电和核电机组的仿真建模及控制技术的研究;E-mail: yangxuhong.sh@163.com

frequency overshoot.

**Key words:** microgrid by photovoltaic and energy storage; virtual synchronous generator; rotational inertia; damping; adaptive control

能源短缺和环境恶化等问题日益加重,各个国家都加大了对新能源的研究以推进可再生能源的开发及利用。微电网中如储能电池、风力发电机、光伏以及柴油机等分布式能源,大多都是通过逆变器电力电子变流器的方式接入电网运行<sup>[1-2]</sup>。但是以电力电子变流器作为接口的并网发电系统,逆变器不具备传统电机所具有的惯性和阻尼特点,致使系统更容易出现功率振荡等问题<sup>[3]</sup>,不利于发电系统的安全稳定运行。

目前,光伏并网发电系统中因光伏出力具有不稳定性,只有配备储能装置才能使系统实现更好并网<sup>[4-9]</sup>。在光伏并网发电系统中,通过引入转子方程即将转动惯量和阻尼系数引入系统中,使得逆变器具有和传统同步发电机相似的外特性,为此,虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)的概念被提出,将此控制方法应用到逆变器中,实现调频以及调压性能,给系统提供惯性支持<sup>[10]</sup>。但VSG控制存在与传统同步机一样的问题,发生扰动时逆变器输出功率会发生振荡,VSG的频率也会受到波动<sup>[11-12]</sup>。因此,对如何抑制VSG的频率和功率波动研究人员做了大量的工作,并提出了相应解决方案。文献[13]研究了阻尼系数对频率稳定性影响,并结合转动惯量控制,提出了转动惯量和阻尼系数的自适应控制方法;文献[14-15]针对VSG采用固定的阻尼参数,提出了可以自适应改变阻尼系数的控制方法并设计了小信号模型,针对不同情况下阻尼系数改变的稳定性分析,此控制方法能够有效抑制输出频率的超调振荡,提升系统频率的稳定性;文献[16]提出了VSG的储能机电暂态特性建模方法,为分布式电源大规模接入电网采用多种控制方式提供参考;文献[17]提出了VSG可变惯量的控制策略,来提高电力系统的暂态稳定性;文献[18]设计了基于VSG的光储并网发电控制技术,将虚拟惯量和阻尼系数引入功率环中,但这2个参数均是固定的,使系统动态响应欠佳;文献[19]根据同步发电机的功角特性曲线和转子角速度振荡曲线的物理意义,确定自适应转动惯量的选取方法,以自适应调整转动惯量;文献[20]针对光伏发电系统的转动惯量控制与低电压穿越问题,建立了一种锁相环非线性模型以适用于暂态分析;文献[21-23]因固

定转动惯量不能同时满足稳定性和快速性要求,提出了可以自适应调整转动惯量的VSG控制策略,并且在孤岛模式下验证所提控制策略的有效性,但对并网情况并未进行验证;文献[24]采用了bang-bang算法来自适应调整系统的转动惯量,对惯量进行稳定分析,设定频率的稳态区间。

本文以光伏储能VSG并网发电系统为研究对象,针对功率振荡以及频率超调问题,首先提出自适应调整转动惯量阻尼的VSG控制策略,系统前级采用光伏最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制以及储能控制策略;其次针对传统的光储VSG并网发电系统,分析转动惯量对VSG频率的动态影响,然后将径向基函数(radial basis functions, RBF)神经网络控制应用于VSG中,自适应调整转动惯量,同时,在固定阻尼比的基础上,随着转动惯量的变化自适应调整阻尼系数。虽然采用RBF神经网络算法会增加系统的运算量,但克服了固定转动惯量的不足之处,不仅能够抑制系统出现的频率超调以及功率振荡情况,而且能够加快系统的响应速度。最后进行仿真验证所提控制策略的有效性。

## 1 光储发电系统基本结构及原理

光伏储能并网发电系统结构如图1所示,其中 $U_{\text{Ndc}}$ 代表直流侧参考电压, $U_{\text{dc}}$ 代表直流母线实际电压, $g_1 \sim g_6$ 表示IGBT<sub>1</sub>~IGBT<sub>6</sub>的PWM驱动信号。逆变器前级系统由光伏阵列、Boost变换器、储能单元和双向DC-DC变换器构成。在此基础上,Boost升压转换器采用了最大功率点追踪控制,以达到最大的太阳能利用率,双向DC-DC转换器的电流能够双向流动,从而实现储能单元的充放电控制。逆变器后级系统通常由逆变器和滤波器构成,其中,采用三相三线制的电压源型桥式逆变器,运用VSG控制策略,以满足分布式电源并网系统的要求。

本文采用扰动观察法实现MPPT,算法简单、容易实现。该方法通过给予输出电压的微小扰动、观察输出功率变化趋势的方式,不断调节输出电压以实现输出功率达到最大的目的。最大功率扰动观察法流程如图2所示,首先测量光伏电源产生的电压和电流,接着计算光伏产生的输出功率,然后

再引入一个电压扰动  $\Delta U$ , 计算扰动后的输出功率  $P_k$  并与前一时刻  $P_{k-1}$  比较, 最终使光伏输出稳定在最大功率点附近。

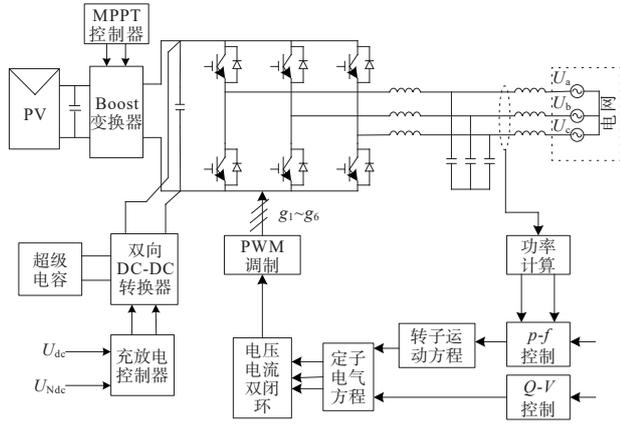


图 1 光伏储能并网发电系统结构

Figure 1 Structure of grid-connected power generation system by photovoltaic and energy storage

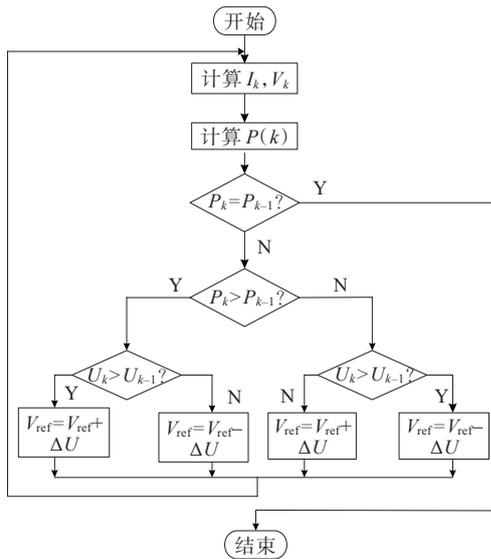


图 2 扰动观察法流程

Figure 2 Flow chart of perturbation observation method

外界环境的变化会影响光伏电池的输出功率, 同时也会引起输出电压的波动, 因此, 在直流侧加入储能控制装置来保持直流侧电压的稳定。储能控制如图 3 所示, 通过储能控制策略, 产生发生器输入信号, 实现调节作用。

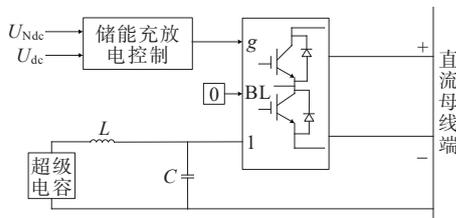


图 3 储能控制框图

Figure 3 Control block diagram of energy storage

## 2 虚拟同步发电机控制策略

逆变器在模拟同步发电机控制时, 主要为了实现有功频率和无功电压 2 个控制。有功功率控制主要模拟同步发电机的惯性、阻尼和有功频率的下垂外特性, 而无功功率控制主要模拟同步发电机的励磁调压特性。

VSG 控制技术通过在转子运动方程中引入转动惯量和阻尼系数这 2 个参数, 来调整系统的频率和有功功率。本文所设计的 VSG 转子运动方程为

$$T_0 - T_e = J \frac{d\omega}{dt} + D_p(\omega - \omega_0) \quad (1)$$

$$P_0 = T_0 \omega \approx T_0 \omega_0 \quad (2)$$

$$P_e = T_e \omega = T_e \omega_0 \quad (3)$$

式(1)~(3)中,  $T_0$  为转矩给定值;  $T_e$  为 VSG 输出转矩;  $J$  为转动惯量;  $\omega$  为虚拟转子角速度;  $\omega_0$  为电网额定电角速度;  $D_p$  为阻尼系数;  $P_0$  为机械功率;  $P_e$  为入网有功功率的瞬时测量值。

根据同步发电机的励磁调节系统, 设计无功电压下垂关系调节为

$$K \frac{d(\sqrt{2} E_m)}{dt} = Q_0 - Q_e - \sqrt{2} D_q (U_g - U_0) \quad (4)$$

$$\theta = \int \omega dt \quad (5)$$

式(4)、(5)中,  $K$  为无功控制环的积分系数;  $E_m$  为内电势有效值;  $Q_0$  为无功功率参考值;  $Q_e$  为入网无功功率的瞬时测量值;  $D_q$  为无功环的电压下垂系数;  $U_g$  为电网电压有效值;  $U_0$  为电网电压参考值;  $\theta$  为内电势相角。

有功和无功功率存在耦合关系。逆变器与电网间的阻抗为电阻电感, 而线路上的电抗远远大于电阻, 从而简化得到逆变器注入电网的功率表达式为

$$\begin{cases} P_e = \frac{3EU_g \sin \delta}{X} \\ Q_e = \frac{3E(E - U_g \cos \delta)}{X} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $X$  为等效电抗;  $\delta$  为功角。

VSG 功率环的小信号模型如图 4 所示, 可以看出有功环和无功环近似解耦<sup>[25]</sup>。图 4 中  $\delta_0$  代表 VSG 输出电压功角,  $E_0$  代表桥臂中点电压的有效值;  $\hat{\omega}$ 、 $\hat{\delta}$ 、 $\hat{E}_e$ 、 $\hat{P}_e$ 、 $\hat{Q}_e$  代表运行点附近加入扰动量。

由图 4 可得有功环路的传递函数为

$$G_c = \frac{K_p}{J\omega_0 s^2 + D_p \omega_0 s + K_p} \quad (7)$$

$$K_p \approx 3E_0 U_0 / X$$

式(7)中需要考虑自然振荡角频率 $\omega_n$ 和阻尼比 $\xi$ 这两个关键参数,表达式为

$$\begin{cases} \xi = \frac{D_p}{2} \cdot \sqrt{\frac{\omega_0}{JK_p}} \\ \omega_n = \sqrt{\frac{K_p}{J\omega_0}} \end{cases} \quad (8)$$

在 $0 < \xi < 1$ 的情况下,有功的响应超调量和调整时间都会随着 $\xi$ 的增加而减少,降低有功响应超调量能够减小储能单元在动态响应中的冲击。在控制工程中,一般采用阻尼适中的方式来调节响应速度和时间,故设计的系统通常是一个阻尼比范围为 $(0, 1)$ 的欠阻尼系统。

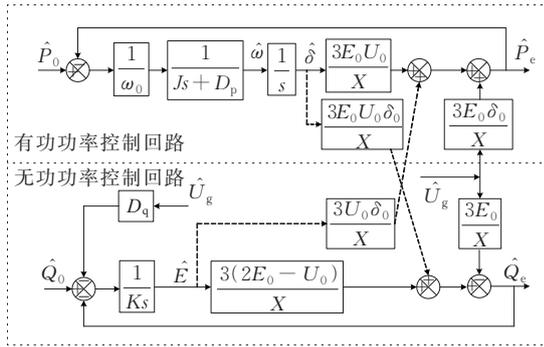


图4 VSG小信号模型

Figure 4 Small signal model of VSG

二阶系统的幅值和相角裕度计算式为

$$\begin{cases} h > 0 \\ \gamma = \arctan\left(2\xi\sqrt{1/\sqrt{4\xi^4 + 1} - 2\xi^2}\right) \end{cases} \quad (9)$$

根据式(9)可知,幅值裕度 $h$ 总是大于0;通常规定系统的相位裕度 $\gamma$ 应该为 $30^\circ \sim 80^\circ$ 。因此,当 $\gamma > 60^\circ$ 时,可以得到 $\xi > 0.612$ 。

系统的闭环极点应为 $\text{Re}(s_i) = -\omega_n \xi = -D_p/2J \leq -10$ 。有功功率环的开环传递函数为

$$\begin{cases} G_{p0} = \frac{3UE_0}{X\omega_0} \cdot \frac{1}{s(Js + D_p)} \\ |G_{p0}(j2\pi f_{cp})| = 1 \end{cases} \quad (10)$$

可以通过截止频率 $f_{cp}$ 来限定阻尼系数 $D_p$ 的变化幅度。由式(10)可以得到

$$J = \frac{D_p}{2\pi f_{cp}} \cdot \sqrt{\left(\frac{3UE_0}{2\pi f_{cp} \omega_0 X D_p}\right)^2 - 1} \quad (11)$$

式(11)中因根号中的表达式恒大于0,则可以得到:

$$f_{cp} \leq \frac{3U_0 E_0}{2\pi \omega_0 X D_p} \triangleq f_{cp\max} \quad (12)$$

从式(12)可以看出,有功功率环的截止频率有

一个最大取值,为降低有功功率测得值波动对系统造成的冲击,一般选择 $f_{cp\max}$ 为2倍工频的10%以内。将最大截止频率定为10 Hz,可以得出阻尼系数的最小值为 $D_p \geq 3U_0 E_0 / 2\pi \omega_0 X f_{cp\max} = 11.5$ 。

依据标准EN 50438,分布式能源所接入电网频率的变化范围为49~50 Hz,频率变化为1 Hz,有功功率相应变化范围为40%~100%。

$$D_p = \Delta P / \omega_0 \Delta \omega_{\max} \quad (13)$$

其中, $\Delta \omega_{\max} = 2\pi$ 。通过计算得出 $J$ 的取值范围为 $[0.05, 0.50]$ , $D_p$ 的取值范围为 $[11.5, 25.0]$ 。

### 3 自适应转动惯量阻尼控制策略

#### 3.1 转动惯量对VSG频率动态特性作用机理

根据VSG转子运动方程式(1)可得到

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_0 - T_e - D_p(\omega - \omega_0)}{J} \quad (14)$$

根据式(14)可知,VSG转动惯量 $J$ 和角速度变化率 $d\omega/dt$ 成反比,若VSG选取较小的转动惯量,在其他量不变的情况下,转子角速度变化率会变大,不利于系统的稳定;若选取很大转动惯量,转子角速度变化率小,角速度变化很慢,同样会影响系统的动态响应。结合功角特性和转子角频率振荡曲线,如图5、6所示,可以进一步分析转动惯量和转子角速度的关系。

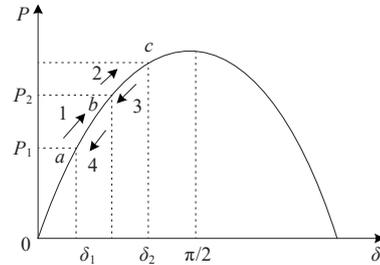


图5 功角特性曲线

Figure 5 Characteristic curve of power-angle

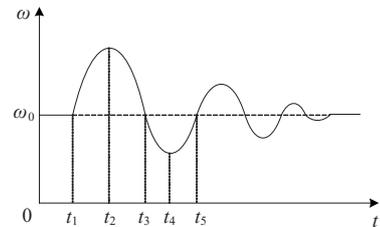


图6 转子角频率振荡曲线

Figure 6 Oscillation curve for rotor angular velocity

图5中1~4分别对应图6中 $t_1-t_2$ 、 $t_2-t_3$ 、 $t_3-t_4$ 、 $t_4-t_5$ 这四个时间段,4个时间段是转子角速度一个完整的暂态过程,而VSG的波动过程则与该过程相似。区间 $[t_1, t_2]$ : $\omega > \omega_0$ 为加速阶段, $d\omega/dt > 0$ , $\omega$ 单调递增,

为了防止角速度增加过快,可以增大转动惯量,防止导致更大的转速超调;区间 $[t_2 t_3]$ : $\omega > \omega_0$ 且 $d\omega/dt < 0$ ,VSG的虚拟转子角速度进入开始减速,转子角频率逐渐靠近电网同步角速度,但此时功角仍在不断增加,为防止功角越限,应适当降低转动惯量;区间 $[t_3 t_4]$ 、 $[t_4 t_5]$ 阶段的调节过程分别与 $[t_1 t_2]$ 、 $[t_2 t_3]$ 的调节过程相似。转动惯量的选取由 $\Delta\omega$ 和 $d\omega/dt$ 共同决定,因此,只有具有适当的转动惯量才能使系统获得更好的频率响应性能。

### 3.2 自适应转动惯量阻尼控制的建立与分析

在传统VSG模型基础上,运用RBF神经网络算法,根据系统不同的运行状态对转动惯量进行调节。RBF自适应控制框图如图7所示。

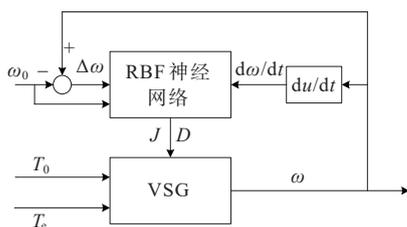


图7 RBF自适应控制框图

Figure 7 Adaptive control block diagram of RBF

虚拟同步发电机具有固有的惯性,即

$$J = \frac{1}{2} m r^2 \quad (15)$$

式中, $m$ 为转子质量; $r$ 为转子半径。

根据经典刚体力学可知,转速为 $\omega$ 、惯性为 $J$ 的转子储存的动能可以表示为

$$E_k = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (16)$$

零时刻设转子额定转速为 $\omega_1$ , $t$ 时刻后转子动能的变化即电磁功率的能量变化用 $\Delta E$ 表示为

$$\Delta E(t) = \frac{1}{2} J \omega_1^2 - \frac{1}{2} J \omega(t)^2 \quad (17)$$

时间 $t$ 时电磁功率输出是能量的微分

$$P_e(t) = \frac{d\Delta E(t)}{dt} = -J\omega(t) \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (18)$$

由式(18)可以看出,功率波动主要是由转子角度的波动而引起的。

$$J = F\left(\omega, \frac{d\omega}{dt}\right) = \frac{-p_e(t)}{\omega(t)} \cdot \frac{dt}{d\omega(t)} \quad (19)$$

由式(19)可知, $J$ 、 $\omega$ 以及 $d\omega/dt$ 呈非线性关系,RBF神经网络具有很好的通用性,可以用来拟合非线性函数,如图8所示。因此,可以采用RBF神经网络对 $J$ 与 $\omega$ 之间的关系进行拟合,以此调整VSG的转动惯量 $J$ 。

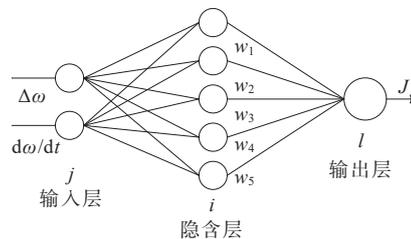


图8 RBF神经网络结构

Figure 8 Structure of RBF neural network

神经网络输入的表达式为

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_j]^T, j = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

隐含层的第 $i$ 个神经元的输出表示为

$$h_i = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{c}_i\|^2}{2b_i^2}\right), i = 1, 2, \dots, m \quad (21)$$

式中, $\mathbf{c}_i = [c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{in}]$ 为第 $i$ 个隐含层的中心向量; $\mathbf{b}_i = [b_1, b_2, \dots, b_m]^T$ 为高斯函数的宽度向量。

RBF神经网络的输出为

$$y = w_1 h_1 + w_2 h_2 + \dots + w_m h_m \quad (22)$$

其中,网络权重 $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_m]$ 。

为了满足系统控制要求,在基础RBF神经网络输出节点中,引入Sigmoid非线性函数,使得神经网络调节具有非线性能力。图8中 $j$ 、 $i$ 、 $l$ 分别表示输入层、隐含层以及输出层的节点数,隐含层函数采用高斯函数。RBF神经网络输入层分别为角频率变化量 $\Delta\omega$ 和角频率变化率 $d\omega/dt$ ,隐含层数为5,输出层数为对应VSG转动惯量 $J$ 。

输入层输出、隐含层输入、隐含层输出分别为

$$O_j^{(1)} = x(j), j = 1, 2 \quad (23)$$

$$N_i^{(2)} = \mathbf{x}, \mathbf{x} = [x(1), x(2)] \quad (24)$$

$$O_i^{(2)}(k) = g(N_i^{(2)}(k)), i = 1, 2, \dots, 5 \quad (25)$$

其中, $x(1) = \omega - \omega_0 = \Delta\omega$ , $x(2) = d\omega/dt$ ,上标(1)、(2)分别表示输入层、隐含层。

高斯基函数、输出层输入、神经网络输出分别为

$$g(x) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{c}_i\|^2}{2b_i^2}\right) \quad (26)$$

$$N_i^{(3)}(k) = \sum_{i=1}^5 w_{ii}^{(3)} O_i^{(2)}(k) \quad (27)$$

$$J = O_i^{(3)}(k) = f(N_i^{(3)}(k)), l = 1 \quad (28)$$

其中, $w_{ii}^{(3)}$ 代表隐含层到输出层的权值,上标(3)表示输出层。

本文用梯度下降法来调节网络权重,同时为了提高收敛速度,在公式中加入惯性项,即

$$\Delta w_{ii}^{(3)}(k) = -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial w_{ii}^{(3)}} + \alpha \Delta w_{ii}^{(3)}(k-1) \quad (29)$$

$$\frac{\partial E(k)}{\partial \omega_i^{(3)}} = \frac{\partial E(k)}{\partial \omega(k)} \cdot \frac{\partial \omega(k)}{\partial J(k)} \cdot \frac{\partial J(k)}{\partial N_i^{(3)}(k)} \cdot \frac{\partial N_i^{(3)}(k)}{\partial \omega_i^{(3)}} \quad (30)$$

其中,  $\eta$  为学习速率;  $\alpha$  为惯性系数。

由于  $\omega(k)/J(k)$  必须在权重更新期间应用, 且推导相对复杂, 因此,  $\omega(k)$ 、 $J(k)$  的相对变化可以求解, 即

$$\frac{\partial \omega}{\partial J} = \frac{\omega(k) - \omega(k-1)}{J(k) - J(k-1)} \quad (31)$$

求解过程中本文只需要得到式(31)的正负情况, 然后使用符号函数  $\text{sign}[(\omega(k) - \omega(k-1))/(J(k) - J(k-1))]$  进行判断。因符号函数的解存在一定的误差, 故可以通过学习率  $\eta$  对其进行修正。

综上所述, RBF 神经网络的权值调整为

$$\begin{aligned} \Delta \omega_i^{(3)}(k) &= \eta (\omega_g(k) - \omega(k)) \cdot \\ &\text{sign} \left[ \frac{\omega(k) - \omega(k-1)}{J(k) - J(k-1)} \right] \cdot f(N_i^{(3)}(k)) \cdot \\ &O_i^{(2)}(k) + \alpha \Delta \omega_i^{(3)}(k-1), \\ &i = 1, 2, \dots, 5, l = 1 \end{aligned} \quad (32)$$

式(32)是对转动惯量的自适应调节, 没有将阻尼系数对系统功率和频率的影响考虑在内。对于传统的VSG二阶系统, 为了使系统具有更好的动态响应, 需要选择合适的阻尼比  $\xi$ , 根据式(8)可知, 当阻尼比保持定值时, 阻尼系数随转动惯量的变化而变化, 从而自适应调节阻尼系数。

## 4 仿真分析

根据所提控制策略于 MATLAB/SIMULINK 中建立光储并网的VSG控制策略仿真模型, 验证控制策略的可行性以及有效性。

### 4.1 储能系统稳压控制策略仿真

将参考电压设为 800 V, 设置电容为  $10^4 \mu\text{F}$ , 电感为 100 mH。按照该文所提控制策略搭建储能控制模块, 测量输出电压, 储能系统能够满足系统的稳定性运行要求。储能充放电系统稳压控制电压波形如图9所示, 系统直流侧电压能够稳定在 800 V 处。

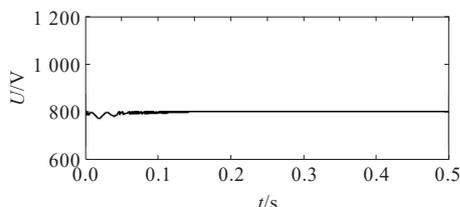


图9 稳压控制电压波形

Figure 9 Control waveform of voltage regulation

### 4.2 MPPT 仿真

光伏电池设计的主要参数: 采用5串66并的光伏阵列模块, 在标准光照强度和环境温度条件下进行工作, 该光伏电池的特性参数开路电压  $U_{oc}$ 、最大功率点处电压  $U_m$  和短路电流  $I_{sc}$ 、最大电流  $I_m$  分别为 64.2、54.7 V 和 5.96、5.58 A。设置初始温度为 25 °C, 光照强度为  $1 \text{ kg/m}^2$ , 测试光伏输出功率跟踪效果; 当外界环境条件改变时测试光伏跟踪灵敏度, 设置初始条件温度为 20 °C, 光照强度为  $1.2 \text{ kg/m}^2$ , 0.4 s 时光照强度增加至  $1.8 \text{ kg/m}^2$ , 0.8 s 时将温度提高至 35 °C, 仿真结果如图10所示, 可知光伏 MTTP 速度良好, 当光照强度或温度改变时, 光伏 MTTP 能够实现准确的跟踪性能, 灵敏度高。

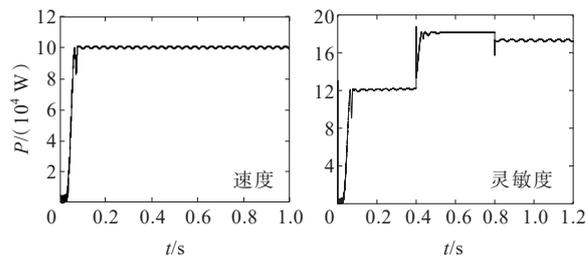


图10 MPPT跟踪速度和灵敏度测试

Figure 10 Results of MPPT tracking speed and sensitivity test

### 4.3 自适应控制策略仿真

根据系统控制策略分析设计虚拟同步发电机部分参数, 如表1所示。

表1 虚拟同步发电机控制参数

Table 1 Control parameters of VSG

直流侧母线电压 $U_{dc}/\text{V}$	电网电压 $U_g/\text{V}$	输出功率 $P/\text{kW}$	电网频率 $f_g/\text{Hz}$	滤波电感 $L_f/\text{mH}$
800	380	10	50	0.6
滤波电容 $C_f/\mu\text{F}$	转动惯量 $J_1$	转动惯量 $J_2$	惯性系数 $\alpha$	学习速率 $\eta$
1 500	0.3	0.5	0.05	0.5

本文研究的是并网模式下的虚拟同步发电机自适应控制, 仿真系统接入电网运行, 初始运行时不加负荷,  $t=0.6 \text{ s}$  时增加 10 kW 有功负荷, 导致VSG角速度发生变化, 自适应VSG的转动惯量及角速度曲线如图11所示, VSG的角速度变化趋势先增大后减小, 转子角频率呈上升趋势时偏离了电网的额定角速度, 此时应增大VSG的转动惯量, 来减缓转子角频率的偏离程度, VSG角速度呈下降趋势时逐渐向电网额定角速度靠近, 此时也应减小转

动惯量以使转子角频率快速达到额定值。

非自适应控制(转动惯量  $J_1 < J_2$ , 阻尼系数固定)与自适应转动惯量及阻尼控制情况下所对应的角速度和有功功率曲线如图 12 所示。

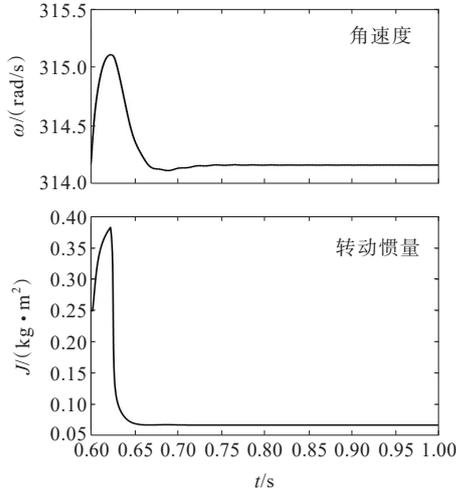


图 11 VSG 角速度和转动惯量曲线

Figure 11 Angular velocity and rotational inertia of VSG

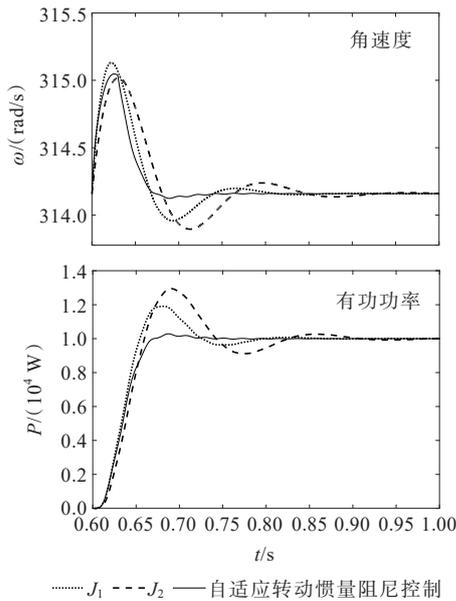


图 12 不同  $J$  情况下角速度和有功功率曲线

Figure 12 Curves of angular velocity and active power with different  $J$

由图 12 角速度曲线可知,当取不同的固定转动惯量时,转动惯量越大,系统的动态响应速度会变慢以及角速度的振荡幅度也越大,所以转动惯量参数越大越不利于系统的频率稳定;若转动惯量取得越小,频率动态响应速度虽然有所改善,但是角速度的超调量却增加,所以转动惯量取得较小,同样会给系统频率稳定性带来不利影响。相比之下,自

适应转动惯量阻尼控制克服了非自适应控制的缺点,改善了系统频率稳定性。

由图 12 有功功率曲线可知,在非自适应控制与自适应转动惯量及阻尼控制所对应的有功功率响应情况下,非自适应控制下有功功率会出现振荡和超调情况,而自适应转动惯量及阻尼控制策略下对应的有功功率曲线几乎没有超调并且响应速度也得以改善,平衡了固定转动惯量大或小的缺点,可以有效抑制功率振荡以及减小角频率的超调。

为了验证本文所提控制策略的有效性,将其与自适应转动惯量控制策略以及文献[24]所采用的 bang-bang 算法进行仿真对比,得到 VSG 角速度以及有功功率的仿真对比,如图 13 所示。其中 bang-bang 算法为

$$\begin{cases} J = \begin{cases} J_{\max}, \Delta\omega \cdot \frac{d\omega}{dt} > 0 \\ J_{\min}, \Delta\omega \cdot \frac{d\omega}{dt} \leq 0 \end{cases} \\ D_p = \begin{cases} D_{p\max}, \Delta\omega \cdot \frac{d\omega}{dt} > 0 \\ D_{p\min}, \Delta\omega \cdot \frac{d\omega}{dt} \leq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (33)$$

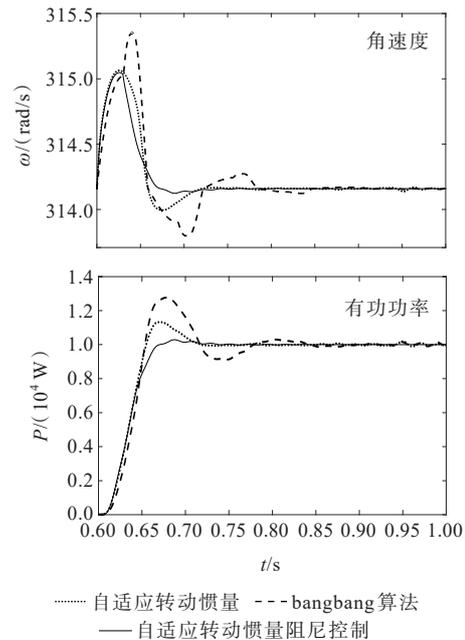


图 13 不同控制策略下角速度和有功功率曲线

Figure 13 Curves of angular velocity and active power under different control strategies

当采取 bang-bang 控制时,有功功率超调为 2 765 W,稳定时间为 0.22 s;当采取自适应转动惯量控制时,有功功率超调为 1 304 W,稳定时间为

0.11 s。使用自适应转动惯量阻尼控制时,有功功率超调为 297 W,稳定时间为 0.064 s,相对于 bang-bang 控制超调量减少 89%,调节时间减少 70.9%;相对于自适应转动惯量控制超调量减少 67%,调节时间减少 41.8%。因此在抑制有功功率振荡情况下,自适应转动惯量阻尼控制的效果要优于 bang-bang 自适应控制策略和自适应转动惯量的控制效果。

## 5 结语

本文针对光储并网系统容易出现功率振荡以及频率超调问题,提出了 VSG 自适应转动惯量阻尼控制策略。该策略将 RBF 应用到 VSG 中,以自适应调整转动惯量,同时,在固定阻尼比的基础上,随着转动惯量的改变以自适应调整阻尼系数。最后,于 MATLAB 中搭建系统仿真模型进行验证,仿真波形图表明,自适应转动惯量阻尼控制下的光储并网发电系统相比其他几种控制策略,能够更有效地抑制功率振荡和频率超调。采用 RBF 神经网络算法时不用人工设计非线性变换,同时能够满足系统实时控制的需要,克服了传统 VSG 的缺点,使系统获得较好的控制性能。

### 参考文献:

- [1] 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. Review and prospect of virtual synchronous generator technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015,39(21):165-175.
- [2] 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 Xinfa, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1):57-70.
- [3] 钟庆昌.虚拟同步机与自主电力系统[J].中国电机工程学报,2017,37(2):336-349.  
ZHONG Qingchang. Virtual synchronous machines and autonomous power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017,37(2):336-349.
- [4] 吕志鹏,盛万兴,刘海涛,等.虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J].中国电机工程学报,2017,37(2):349-360.  
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, LIU Haitao, et al. Application and challenge of virtual synchronous machine technology in power system[J]. Proceeding of the CSEE, 2017,37(2):349-360.
- [5] 方保民,李红志,孔祥鹏,等.含高比例光伏出力的长期分布式储能配置研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(2):121-129.  
FANG Baomin, LI Hongzhi, KONG Xiangpeng, et al. Research on long-term distributed energy storage configuration with a high proportion of photovoltaic output[J]. Power System Protection and Control, 2021,49(2):121-129.
- [6] 张克勇,王冠瑞,耿新,等.含高比例光一储单元的主动配电网并网功率分布式协同控制策略[J].电力科学与技术学报,2022,37(2):147-155.  
ZHANG Keyong, WANG Guanrui, GENG Xin, et al. Distributed cooperative control strategy for grid-connected power in ADN with high proportion of PV-ESS units[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022,37(2):147-155.
- [7] 盛师贤,周鑫,王德林,等.虚拟同步风电场协同光伏电站附加阻尼控制方法[J].中国电力,2022,55(3):177-186.  
SHENG Shixian, ZHOU Xin, WANG Delin, et al. Additional damping cooperative control method of virtual synchronous wind farm and photovoltaic power stations[J]. Electric Power, 2022,55(3):177-186.
- [8] 梅书凡,檀勤良,代美.考虑风光出力季节性波动的储能容量配置[J].电力工程技术,2022,41(4):51-57.  
MEI Shufan, TAN Qinliang, DAI Mei. Energy storage capacity configuration considering seasonal fluctuation of wind and photovoltaic output[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022,41(4):51-57.
- [9] 刘建伟,李学斌,刘晓鸥.有源配电网中分布式电源接入与储能配置[J].发电技术,2022,43(3):476-484.  
LIU Jianwei, LI Xuebin, LIU Xiaou. Distributed power access and energy storage configuration in active distribution network[J]. Power Generation Technology, 2022,43(3):476-484.
- [10] 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 microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16):2591-2603.
- [11] 温春雪,陈丹,胡长斌,等.微网逆变器的VSG转动惯量和阻尼系数自适应控制[J].电力系统自动化,2018,42(17):120-126+183.  
WEN Chunxue, CHEN Dan, HU Changbin, et al. Self-adaptive control of rotational inertia and damping coefficient of VSG for converters in microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018,42(17):120-126+183.
- [12] 陈伟,张岩,屠一鸣,等.LCL型并网逆变器临界无源阻尼参数设计[J].电力建设,2022,43(1):70-77.

- CHEN Wei, ZHANG Yan, TU Yiming, et al. Design of critical passive damping parameters for LCL-type grid-connected inverter[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(1):70-77.
- [13] 李东东,朱钱唯,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].电力自动化设备,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]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11):72-77.
- [14] 朱作滨,黄绍平,李振兴.微电网逆变器自适应阻尼系数VSG控制策略研究[J].控制工程,2021,28(8):1628-1633.
- ZHU Zuobin, HUANG Shaoping, LI Zhenxing. Research on control strategy of micro-grid adaptive damping VSG [J]. Control Engineering of China, 2021, 28(8):1628-1633.
- [15] LIU J, MIURA Y, ISE T. Fixed-parameter damping methods of virtual synchronous generator control using state feedback[J]. IEEE Access, 2019, 7:99177-99190.
- [16] 和萍,李钊,李从善,等.基于虚拟同步机技术的储能机电暂态特性建模[J].电力系统保护与控制,2022,50(7):11-22.
- HE Ping, LI Zhao, LI Congshan, et al. Electromechanical transient modeling of energy storage based on virtual synchronous machine technology[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7):11-22.
- [17] LIU J, YANG D, YAO W, et al. PV-based virtual synchronous generator with variable inertia to enhance power system transient stability utilizing the energy storage system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1):39.
- [18] 陈文倩,辛小南,程志平.基于虚拟同步发电机的光储并网发电控制技术[J].电工技术学报,2018,33(S2):538-545.
- CHEN Wenqian, XIN Xiaonan, CHENG Zhiping, et al. Control of grid-connected of photovoltaic system with storage based on virtual synchronous generator[J]. Transactions of the China Electrotechnical Society, 2018, 33(S2):538-545.
- [19] 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.
- [20] 田雨果,王彤,邢其鹏,等.计及虚拟惯量控制与低电压穿越的光伏发电系统暂态稳定分析[J].电力系统保护与控制,2022,50(2):52-59.
- TIAN Yuguo, WANG Tong, XING Qipeng, et al. Transient stability analysis of a photovoltaic generation system considering virtual inertia control and low voltage ride-through[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2):52-59.
- [21] 朱作滨,黄绍平,李振兴,等.微网自适应旋转惯量VSG控制策略研究[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(4):111-115.
- ZHU Zuobin, HUANG Shaoping, LI Zhenxing, et al. Research on control strategy for micro-grid adaptive rotating inertia virtual synchronous generator[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(4):111-115.
- [22] 程启明,余德清,程尹曼,等.基于自适应旋转惯量的虚拟同步发电机控制策略[J].电力自动化设备,2018,38(12):79-85.
- CHENG Qiming, YU Deqing, CHENG Yinman, et al. Control strategy of virtual synchronous generator based on adaptive rotational inertia[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12):79-85.
- [23] 张丹丹,陈俊钦,阳瑞霖.巨型水轮发电机中性点新型接地方式分析[J].高压电器,2023,59(1):1-7.
- ZHANG Dandan, CHEN Junqin, YANG Ruilin. Analysis of new grounding mode for neutral point of giant hydro-generator[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(1):1-7.
- [24] WANG F, ZHANG L J, FENG X Y, et al. An adaptive control strategy for virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5):5124-5133.
- [25] 吴恒,阮新波,杨东升,等.虚拟同步发电机功率环的建模与参数设计[J].中国电机工程学报,2015,35(24):6508-6518.
- WU Heng, RUAN Xinbo, YANG Dongsheng, et al. Modeling of the power loop and parameter design of virtual synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24):6508-6518.