

# 基于虚拟同步发电机的新能源发电惯性控制研究

## Research on Inertial Control of New Energy Generation Based on Virtual Synchronous Generator

赫辉

Hui He

黄冈大别山发电有限责任公司 中国·湖北 麻城 438300

Huanggang Dabieshan Power Generation Co., Ltd., Macheng, Hubei, 438300, China

**摘要:** 新能源发电具有间歇性与波动性的特点, 这容易造成发系统频率不稳定。为了调节和稳定新能源发电系统的频率, 论文引入发电惯性控制策略, 阐述虚拟同步发电机的结构、控制原理以及惯性响应, 同时指出现有虚拟惯性存在的问题, 在此基础上建立适当的控制模型与算法, 以此优化与改进发电惯性控制策略, 而后通过仿真实验来验证控制策略的可靠性与有效性。

**Abstract:** New energy power generation has the characteristics of intermittency and volatility, which can easily cause instability in the frequency of the power generation system. In order to regulate and stabilize the frequency of the new energy generation system, this paper introduces a power generation inertia control strategy, elaborates on the structure, control principle, and inertia response of the virtual synchronous generator, and points out the problems with virtual inertia. Based on this, appropriate control models and algorithms are established to optimize and improve the power generation inertia control strategy. Then, simulation experiments are conducted to verify the reliability and effectiveness of the control strategy.

**关键词:** 虚拟同步发电机; 新能源发电; 惯性控制

**Keywords:** virtual synchronous generator; new energy power generation; inertial control

**DOI:** 10.12346/etr.v5i7.8297

## 1 引言

近几年, 新能源在电力系统中的比例逐年增加, 这导致电力系统存在一定程度的频率扰动。由于传统惯性控制策略不能较好适应新能源发电系统的需求与特点, 因此基于虚拟同步发电机, 建立适当的控制模型, 提出一种新的惯性控制策略, 以此大幅改善电力系统频率稳定性, 从而确保电力系统的稳定可靠运行, 并进一步促进新能源的可持续发展与能源结构转型。

## 2 虚拟同步发电机相关概述

### 2.1 虚拟同步发电机结构

虚拟同步发电机旨在解决电力系统因接入分布式能源而出现的惯量缺失、波动性大、功率不稳定及分配复杂等问题, 通过控制 VSG 逆变器, 实现调节频率的功能, 且具有灵活

性高、响应速度快等优点。其主要组成部分有存储系统、VSG 逆变器以及新能源发电单元等, 其中, 新能源发电单元(如光伏阵列或风力机)负责提供一次侧能源, VSG 逆变器则通过模拟传统同步机的特性来控制逆变器的输出特性与母线上的能量流动<sup>[1]</sup>。

### 2.2 虚拟同步发电机控制原理

虚拟同步发电机作为一种用来解决电力系统因接入分布式能源而产生的频率稳定性问题, 其主要控制原理包括两方面, 第一, 虚拟同步发电机利用频率响应来调节系统频率。如果系统负荷出现变化, 致使频率偏离标准值, 此时, 虚拟同步发电机会利用控制器来监测系统频率变化, 同时结合预设的频率偏差范围来灵活调整和改变输出功率, 从而使系统恢复至目标频率。第二, 虚拟同步发电机具有调节功率的功能。当系统负荷需求减少或增加时, 虚拟同步发电机能够利

【作者简介】赫辉(1984-), 男, 中国山西朔州人, 本科, 工程师, 从事新能源发展及储能发电研究。

用控制器来调整自身输出功率,控制器按照系统负荷需求,同时结合其他运行参数,通过运算得出适当的功率变化量,而后向VSG逆变器发送调整指令,如此达到维持系统功率平衡的目的<sup>[2]</sup>。

### 2.3 虚拟同步发电机的惯性响应

惯性响应作为虚拟同步发电机的一种重要特性,当系统频率出现变化时,通过使用控制器来适当调整输出功率,以维持频率稳定。其依赖控制器感知频率变化与调节输出功率而实现,在系统负荷减少或增加时,控制器能够监测系统频率与标准值之间的偏差,从而计算出适当的功率变化量并及时调整虚拟同步发电机输出功率。惯性响应在维持系统频率稳定方面起着至关重要的作用,其模拟以往同步发电机的惯量作用,从而提供额外的能量储备与转动惯量,以此使提升系统的频率调节能力,进而避免波动过大,有效确保电力系统的稳定运行。提高控制器的响应速度与优化控制策略,有助于增强惯性响应特性,不仅可以很好地解决电力系统因接入分布式能源而出现的频率不稳定性问题,还可以为提高电力系统的可靠性与稳定性提供有力的技术支持。

## 3 现有虚拟惯性存在的问题

### 3.1 一阶虚拟惯性存在的问题

一阶虚拟惯性作为虚拟同步发电机常用的模型之一,主要用来解决电力系统因接入分布式能源而出现的频率不稳定性问题,其通过模拟发电机的惯量作用来为系统提供频率稳定性支持,然而,其在稳态偏差控制方面与动态响应方面存在诸多问题与限制,且不能同时达到减少稳态均分误差与实现优化动态特性的目的。主要原因如下:①并网运行时,因为存在耦合作用,通过增大阻尼系数 $D\omega$ 来限制有功振荡会增大输出有功稳态偏差,反之,通过减小阻尼系数 $D\omega$ 来提升动态响应速度会出现较大的有功超调;②如果不设置稳态运行点,则初始时功率存在较大波动;③一阶虚拟惯性模型对额定频率与电网频率的偏差较为敏感,如果两者存在一定偏差,通过增大阻尼系数 $D\omega$ 来限制有功振荡会增大输出有功稳态偏差,且输出有功稳态偏差与 $D\omega$ 呈线性关系。由此,需要改进与优化虚拟同步发电机控制策略,以有效解决一阶虚拟惯性模型中的问题,从而提高电力系统的性能与可靠性<sup>[3]</sup>。

### 3.2 改进虚拟惯性存在的问题

改进的虚拟惯性控制策略基于微分补偿,一方面能够保持稳态有功偏差;另一方面可以减小振荡与功率超调,从而大幅提高有功动态特性。相较于一阶虚拟惯性,改进的虚拟惯性拥有更大的系统阻尼比与稳态有功偏差,能够实现较好的频率稳定性。改进的虚拟惯性引入微分补偿项,可以在初始响应阶段展现出下垂特性,同时表现出较强的频率支撑能力,如此一来,大幅提升系统响应负荷变化的准确度与速度。然而,改进的虚拟惯性控制策略也存在一些问题与不足,首

先,设置微分补偿参数需要综合考虑电网负荷情况以及不同电网条件,只有科学合理的分补偿参数才可以发挥较好的作用;其次,初始运行时极易出现功率调节时间延迟与较大的功率波动。另外,改进的虚拟惯性控制策略在额定频率与电网频率两者之间具有较大偏差时仍不能有效限制有功超调。因此,还需要进一步改进算法与优化参数设置,不仅要解决特殊情况下的限制与问题,还需要继续提高系统的动态响应能力与稳态特性。

## 4 基于二阶虚拟惯性控制策略

### 4.1 风机虚拟同步发电机的惯性控制

应用于风机虚拟同步发电机中的惯性控制非常重要,由于风能系统中风速变化会使风机输出功率产生波动,因此需要采取一些措施来尽可能避免或减小这种波动,以确保稳定的电网频率<sup>[4]</sup>。虚拟同步发电机基于变流器技术,其控制系统中融入惯性控制可以拥有与传统同步发电机相类似的惯性特性。具体来说,风机虚拟同步发电机使用转矩信号与转速来反馈,同时配合传统比例积分微分(PID)控制算法来完成惯性控制,通过滤波与处理转矩信号与转速来得到同真实旋转部件类似的响应,并将这些响应作为频率调节环路的输入信号。接着,在频率调节环路中,惯性控制会基于当下频率和额定频率之间的偏差量来生成一个适当调整量,并将该调整量以控制信号的形式发送至发电机控制器,该调整量能够影响有功功率输出,以灵活稳定调节电网频率。

### 4.2 光储虚拟同步发电机的惯性控制

应用于光储虚拟同步发电机中的惯性控制非常关键,由于光储能系统中太阳能储能装置与光伏发电的特性,能够导致系统输出功率产生一定程度的波动,因此需要采取一些措施来尽可能避免或减小这种波动,以确保稳定的电网频率。光储虚拟同步发电机能够使用太阳能储能装置与光伏阵列的输出功率来反馈,同时配合传统比例积分微分(PID)控制算法来完成惯性控制,通过滤波与处理转矩信号与转速来得到同真实旋转部件类似的响应,并将这些响应作为频率调节环路的输入信号。而后,同风机的惯性控制过程类似,惯性控制根据实际情况产生一个适当调整量,通过控制光储虚拟同步发电机的控制器来影响有功功率输出,从而灵活稳定调节电网频率。

### 4.3 基于二阶虚拟惯性控制策略

#### 4.3.1 惯性特性模拟方法

在新能源发电系统中,惯性控制策略的改进与优化主要是改进惯性特性模拟方法与优化相关参数等。从惯性特性模拟方法方面来看,为了使模拟的惯性特性更接近于真实的传统同步发电机惯性特性,可以从以下几个方面进行优化与改进:①转矩信号与转速反馈,通过实时监测太阳能光伏阵列或风能的输出功率与储能装置的真实情况来获得转矩信号与转速信号,并将这些信号作为反馈的输入信号,进而得到

类似于传统同步发电机旋转部件的真实动态响应；②滤波与处理，经过一定处理与滤波转速和转矩信号，能够得到类似于传统同步发电机旋转部件响应且平滑的响应反馈；③传递函数建模，基于上述得到的转矩与转速信号，设计合适的用于描述系统惯性特性的传递函数模型。通过上述改进与优化，可以使模拟的惯性特性更接近于真实的传统同步发电机惯性特性，从而做到及时、科学地响应电网频率变化。

#### 4.3.2 控制器设计与参数优化

控制器设计与参数优化是新能源发电惯性控制策略的核心与关键，常见的控制器改进与参数优化的方法如下：

①PID控制器，PID控制器作为重要且常见的一种控制策略，可以通过调整微分与积分增益参数或是比例来稳定调节系统频率，实际选择与设置参数时需要结合与考虑系统性能要求与实际情况，从而选择最佳的参数与比例；②模糊逻辑控制，其基于经验规则，可以根据电网实际情况，科学设定适当的隶属函数与模糊规则来更好地处理电网系统中不确定性或非线性问题；③神经网络控制，该控制方法基于人工神经网络，由于神经网络具有良好的非线性映射能力与自适应性，因此虚拟同步发电机惯性控制使用神经网络控制能够更好地适应电网系统变化，从而做到稳定调节系统频率；④遗传算法优化，遗传算法作为一种优化方法，可以有效模拟自然进化过程，以此搜索最合适的解决方案，虚拟同步发电机惯性控制使用遗传算法可以得到最恰当的控制参数组合，有助于提高电网系统的稳定性与性能。

#### 4.3.3 惯性控制策略设计

为进一步提升虚拟同步发电机系统的稳定性与性能，基于上述分析，同时在改进的虚拟惯性控制策略的基础上，增加一个串联的惯性环节，通过增加一个可调极点来灵活修正虚拟惯性的初始响应特性。相较于一阶虚拟惯性、改进虚拟惯性，论文设计的虚拟惯性控制策略拥有更大的初始响应阶段惯性与更快的响应速度，其可以更精准追踪负荷变化且拥有更强的频率支撑能力。

虚拟同步发电机系统引入二阶虚拟惯性后，能够实现多重控制目标，如提高动态特性、减小振荡与功率超调以及保持稳态有功偏差等。该控制策略不仅能够使系统在稳定状态下具有较小的功率偏差，还可以在负荷变化时迅速恢复至新的平衡点，这大幅提升抑制电网频率扰动的能力。由于该控制策略具有更迅速、更精确的负荷响应，能够减少对传统发电机的依赖，因此在实际应用中具有潜在的应用前景。

## 5 实验结果与讨论

为验证论文设计的控制策略的实用性与有效性，论文搭

建虚拟同步发电机并网实验平台，观察与比对使用一阶虚拟惯性控制策略、该控制策略的系统的动态特性与稳态。论文实验环境选用渗透率较高的弱电网，电网频率会有秒级波动，但保持在额定频率附近。系统使用一阶虚拟惯性控制策略， $P_{ref}$ 从20kW跳变到40kW，输出功率出现振荡，约2.5s后恢复到稳态，这表明增大虚拟惯量会降低系统的稳定性。增大阻尼系数的值以提高输出功率的动态特性，系统并网电流、输出有功及输出电压角频率波形，阻尼系数增大导致有功稳态偏差增大，约为16kW，这说明使用一阶虚拟惯性控制策略的电力系统并网运行时其输出功率在动态特性与稳态调节方面存在矛盾；系统使用本文设计的控制策略，当 $P_{ref}$ 从20kW跳变到40kW时，得到的对应波形。

采用论文设计的控制策略的系统并网运行中有功指令出现突变时，输出功率没有发生振荡，约0.6s后恢复至稳态，当有功超调 $\sigma P$ 调至20%，而稳态输出有功功率误差还维持在8kW。经实验表明，本文设计的控制策略不仅可以保持有功稳态误差，还可以提升输出有功的动态特性，同时拥有较大的初始响应惯性。虽然，论文设计的控制策略存在很多明显优势，然而，也存在一定的问题与不足，如算法设计与参数设置需要进一步改进与优化以匹配于不同的负荷情况与电网条件，初始运行阶段可能存在的调节时间延迟与较大的功率波动，特殊情况下不能有效抑制有功超调等。未来，将专注于算法设计改进、精确参数调整以及引入其他补偿手段等，不断提高系统性能与稳定性。

## 6 结语

综上所述，论本设计的控制策略能够有效解决电力系统因新能源接入而产生的频率不稳定的问题，然而，目前新能源发电惯性控制仍存在许多问题与挑战，如控制模型与算法的优化与改进等。未来，将不断研究与创新以提高发电惯性控制策略的响应速度与精确度，持续优化系统运行效率，从而实现清洁能源的可持续发展和大规模应用。

## 参考文献

- [1] 郑云平,焦春雷,亚夏尔·吐尔洪,等.基于新能源发电的构网型协调储能控制策略研究[J].高压电器,2023,59(7):65-74.
- [2] 何叶.新能源发电侧储能技术创新发展研究[J].新能源科技,2022(11):27-29.
- [3] 陈海东,蒙飞,王庆,等.储能系统和新能源发电装机容量对电力系统性能的影响[J].储能科学与技术,2023,12(2):477-485.
- [4] 陈裕.分布式新能源发电的混合储能控制策略研究[D].唐山:华北理工大学,2022.