

面向构网型新能源并网的电力电子变流器自适应虚拟同步控制策略

加康

临汾汾能电力科技试验有限公司, 山西 临汾 041000

DOI: 10.61369/SSSD.2026060022

摘 要 : 在“双碳”目标引领下, 构网型新能源并网成为电力系统转型的关键方向, 电力电子变流器的控制策略直接决定并网系统稳定性。传统虚拟同步控制 (VSG) 采用固定参数, 难以适配新能源出力波动、电网扰动等复杂工况, 易引发频率振荡、电压偏差等问题。自适应虚拟同步控制策略通过实时检测电网状态参数动态调整控制参数, 经工程实践验证可显著提升并网系统抗干扰能力与稳态性能^[1]。结合临汾汾能电力科技试验有限公司的工程应用经验, 本文对该策略的理论原理、设计方法及工程应用进行系统阐述, 为相关领域试验与技术服务提供理论与工程参考。

关 键 词 : 构网型新能源; 电力电子变流器; 自适应控制; 虚拟同步发电机; 并网稳定

Adaptive Virtual Synchronous Control Strategy of Power Electronic Converters for Grid-Forming New Energy Grid Connection

Jia Kang

Linfen Fenneng Electric Power Technology Test Co., Ltd., Linfen, Shanxi 041000

Abstract : Driven by the "Dual Carbon" goals, grid-forming new energy grid connection has become a pivotal direction for the transformation of power systems, and the control strategies of power electronic converters directly determine the stability of grid-connected systems. Traditional Virtual Synchronous Control (VSG) adopts fixed parameters, which are difficult to adapt to complex operating conditions such as fluctuations in new energy output and grid disturbances, and are prone to problems including frequency oscillation and voltage deviation. The adaptive virtual synchronous control strategy dynamically adjusts the control parameters by real-time detection of grid state parameters, which has been verified by engineering practice to significantly improve the anti-interference capability and steady-state performance of grid-connected systems. Combining the engineering application experience of Linfen Fenneng Electric Power Technology Test Co., Ltd., this paper systematically expounds the theoretical principles, design methods and engineering applications of this strategy, providing theoretical and engineering references for tests and technical services in related fields.

Keywords : grid-forming new energy; power electronic converter; adaptive control; virtual synchronous generator; grid connection stability

引言

(一) 研究背景与意义

我国“碳达峰、碳中和”战略目标推动新能源发电从“补充能源”向“主体能源”转型, 光伏、风电等新能源并网规模持续扩大。传统跟网型控制模式下, 并网变流器不具备同步发电机的惯量与阻尼特性, 导致电网等效惯量下降、阻尼不足, 引发频率波动、电压不稳等问题, 英国“8.9”、南澳大利亚“9.28”大停电均与此相关^[2]。

构网型新能源并网模式通过控制变流器模拟同步发电机外特性, 为电网提供惯量与阻尼支撑, 是解决高比例新能源并网稳定性问题的关键路径。虚拟同步控制 (VSG) 作为构网型控制主流技术, 虽能实现主动并网支撑, 但传统 VSG 采用固定虚拟惯量与阻尼系数, 无法适配新能源出力随机性、电网阻抗动态变化等工况, 存在频率振荡、响应迟缓等缺陷。

临汾汾能电力科技试验有限公司专注于电力电子设备试验、新能源并网测试等业务, 积累了丰富工程经验。随着新能源并网规模扩张, 公司相关试验业务量激增, 亟需先进控制策略支撑试验精度提升^[3]。因此, 开展自适应虚拟同步控制策略研究, 不仅具有重要理论价值, 更能为公司试验业务优化、技术升级提供有力支撑, 保障区域新能源并网工程安全稳定运行。

（二）国内外研究现状

国外对构网型新能源并网与 VSG 技术研究起步较早，欧美搭建示范工程提出频率偏差反馈式惯量自适应方法，但未考虑电压与功率波动协同影响；日本结合模糊控制的 VSG 自适应策略，存在规则设计复杂、控制精度有限等问题。

国内高校提出基于根轨迹法、强化学习的 VSG 参数自适应策略，虽提升了动态性能，但计算复杂、工程实现难度大；部分企业优化 VSG 控制结构，却未兼顾新能源出力与电网扰动协同影响^[4]。临汾汾能电力科技试验有限公司在试验中发现，现有 VSG 策略适应性差、精度不足，亟需兼顾理论与实用性的自适应控制策略。

（三）研究内容与技术路线

本文结合公司工程实践，系统阐述自适应虚拟同步控制策略的理论、设计、仿真及应用，重点包括：构网型新能源并网系统建模与传统 VSG 局限性分析；自适应控制策略原理与设计；仿真验证；工程试验应用。技术路线为：明确研究背景与意义→梳理国内外研究现状→建立系统数学模型→设计自适应控制策略→开展仿真验证→实施工程试验验证→总结成果与展望。

一、构网型新能源并网系统建模与传统 VSG 控制局限性分析

（一）构网型新能源并网系统拓扑结构

构网型新能源并网系统由新能源发电单元、电力电子变流器、滤波环节、并网接口及公共电网组成。新能源电能经直流滤波后送入变流器，变流器采用电压源型拓扑，通过构网型控制将直流电能转换为与电网同频同相的交流电，经 LC 滤波滤除高频谐波后接入电网。公司试验平台均采用此类拓扑，确保试验与工程实际一致^[5]。

（二）电力电子变流器数学模型

采用 dq 同步旋转坐标系建模，忽略开关损耗与死区效应，通过 Park 变换得到变流器交流侧 dq 轴数学模型，反映滤波电感、输出电流、电网角频率等参数的动态关系；直流侧能量平衡方程反映直流电容、电压变化率、新能源出力与功率传递的关联，为控制策略设计提供理论基础。

（三）传统虚拟同步控制（VSG）数学模型

传统 VSG 核心数学模型包括：转子运动方程（模拟同步发电机惯性与阻尼，由虚拟机械转矩、电磁转矩及阻尼系数决定）、有功-频率下垂控制方程（通过有功偏差调整虚拟机械转矩，维持频率稳定）、无功-电压下垂控制方程（通过无功偏差调整输出电压参考值，保障电压稳定）。

（四）传统 VSG 控制局限性分析

结合公司试验经验，传统 VSG 固定参数存在明显缺陷：一是难以适配新能源出力波动，如光伏出力从 50% 突变至 80% 时，频率偏差达 0.5Hz，超出 GB/T 19963-2021 规定的 $\pm 0.2\text{Hz}$ 范围；二是电网扰动适应性弱，电网电压跌落 10% 时，无功功率波动达 20%，稳态调整时间超 0.5s；三是无法兼顾稳态精度与动态响应，固定参数配置存在固有矛盾。因此，亟需设计自适应控制策略解决上述问题。

二、构网型新能源并网的自适应虚拟同步控制策略原理与设计

（一）控制策略设计目标

结合系统需求与公司试验经验，自适应 VSG 控制策略目

标为：具备实时自适应调节能力，适配复杂工况；频率偏差 $\leq \pm 0.2\text{Hz}$ 、电压偏差 $\leq \pm 5\%$ 、稳态调整时间 $\leq 0.3\text{s}$ ，动态与稳态性能优良；结构简洁、计算量小，便于工程实现；抗干扰能力强，运行可靠。

（二）自适应调节机制设计

核心为多参数协同自适应调节机制，通过检测频率偏差 $\Delta\omega$ 、电压偏差 ΔU 、功率波动 ΔP_e 、 ΔQ ，构建调节函数，动态优化虚拟惯量 J、阻尼系数 D 及下垂系数 K_p 、 K_q 。

频率偏差自适应调节： $\Delta\omega$ 较大时，减小 J、增大 D 加快响应； $\Delta\omega$ 较小时，增大 J、减小 D 提升精度，结合变论域模糊控制构建调节函数，实现二者协同优化。

电压偏差自适应调节：综合 ΔU 与 ΔQ 影响，构建无功下垂系数 K_q 调节函数，偏差越大， K_q 越趋近最大值，加快调压速度；偏差越小， K_q 趋近最小值，提升稳态精度。

功率波动自适应调节：以 ΔP_e 为核心，构建有功下垂系数 K_p 调节函数，波动越大， K_p 越趋近最大值，抑制频率波动；波动越小， K_p 趋近最小值，提升频率精度。

（三）自适应 VSG 控制整体架构与工作原理

控制架构分为四部分：信号检测模块（采集电压、电流、新能源出力信号，处理得到状态参数）；自适应参数调节模块（代入调节函数，更新控制参数）；VSG 核心控制模块（基于新参数生成电压参考值）；电流电压双环控制模块（生成 PWM 驱动信号，控制变流器跟踪参考值，增设保护环节）。各模块协同工作，确保系统稳定^[6-7]。

（四）控制策略稳定性分析

采用小信号分析法，对自适应 VSG 模型线性化，得到小信号特征方程。结合公司试验平台参数仿真验证，合理设置调节系数与参数上下限，可使所有特征值位于复平面左半平面，证明策略运行稳定。

三、自适应虚拟同步控制策略仿真分析

（一）仿真模型搭建

基于 MATLAB/Simulink 搭建仿真模型，结合公司试验参数设定：光伏额定功率 100kW，变流器为两电平电压源型（额定

380V，开关频率10kHz），电网额定50Hz，传统与自适应 VSG 参数明确。设置两种工况：新能源出力突变（50kW →80kW）、电网电压扰动（跌落10%后恢复），对比两种控制策略效果^[7]。

（二）仿真结果分析

工况1（出力突变）：传统 VSG 频率偏差最大0.5Hz、调整时间0.6s，电压偏差7%、调整时间0.5s，有功波动15%；自适应 VSG 频率偏差0.15Hz、调整时间0.2s，电压偏差3.5%、调整时间0.18s，有功波动5%，动态与稳态性能更优。

工况2（电压扰动）：传统 VSG 电压偏差12%、调整时间0.7s，无功波动20%；自适应 VSG 电压偏差6%、调整时间0.25s，无功波动8%，抗干扰能力显著提升。

仿真结论：自适应 VSG 策略各项性能指标满足标准与设计目标，优于传统 VSG，为工程应用奠定基础。

四、自适应虚拟同步控制策略工程试验应用

（一）试验平台搭建

依托公司试验资源搭建平台：直流电源模拟新能源单元，100kW 两电平变流器（DSP+FPGA 架构），阻感负载模拟电网，NI 数据采集系统记录数据，控制系统嵌入两种控制算法，开展对比试验，工况与仿真一致，每类工况重复3次取平均值。

（二）试验结果分析

工况1（出力突变）：传统 VSG 频率偏差0.48Hz、调整时间

0.58s，电压偏差6.8%、调整时间0.49s，有功波动14.5%；自适应 VSG 频率偏差0.16Hz、调整时间0.22s，电压偏差3.6%、调整时间0.19s，有功波动5.2%，与仿真结果一致。

工况2（电压扰动）：传统 VSG 电压偏差11.8%、调整时间0.68s，无功波动19.6%；自适应 VSG 电压偏差6.2%、调整时间0.26s，无功波动8.3%，抗干扰能力达标。

试验结论：自适应 VSG 策略工程实用性得到验证，可直接应用于公司试验业务，为技术服务提供支撑^[8-9]。

五、自适应虚拟同步控制策略理论价值与工程应用总结

（一）理论价值与工程应用总结

本文提出的自适应虚拟同步控制策略，有效解决了传统 VSG 固定参数的局限性；基于多参数协同调节机制，实现动态与稳态性能兼顾，理论严谨；仿真与试验验证表明，策略性能满足标准，结构简洁、便于工程实现，可适配公司试验平台，提升公司技术竞争力，保障区域新能源并网安全^[10]。

（二）技术发展前景

未来将开展多台变流器协同控制研究，适配多机并网试验；融合智能优化算法，提升极端工况抗干扰能力；优化工程实现方案，降低成本，推动规模化应用。

参考文献

- [1] 张承瑞，李娟，王磊. 构网型新能源并网虚拟同步控制技术研究进展 [J]. 电力系统自动化，2023，47(12): 1-18.
- [2] 李建林，赵斌，刘静. 电力电子变流器虚拟同步控制原理与应用 [M]. 北京：中国电力出版社，2022.
- [3] 王士柏，张帆，李鹏. 面向高比例新能源并网的自适应虚拟同步控制策略 [J]. 中国电机工程学报，2023，43(8): 2890-2902.
- [4] 刘敏，陈杰，张强. 构网型逆变器虚拟同步控制参数自适应优化方法 [J]. 电工技术学报，2023，38(10): 2678-2688.
- [5] GB/T 19963-2021. 光伏电站接入电力系统技术规定 [S]. 北京：中国标准出版社，2021.
- [6] 陈树勇，李占奎，丁杰. 高比例新能源并网电力系统稳定性分析与控制 [J]. 中国电机工程学报，2022，42(1): 1-16.
- [7] 赵清林，王艳，李洪珠. 电压源型逆变器虚拟同步控制稳定性研究 [J]. 电力自动化设备，2023，43(5): 123-130.
- [8] 临汾汾能电力科技试验有限公司. 电力电子变流器试验规程 [Z]. 2024.
- [9] 王宇，李丽，张磊. 基于模糊控制的虚拟同步机参数自适应调节策略 [J]. 电力系统保护与控制，2023，51(7): 102-110.
- [10] Huang Y, Li W, Zhang H. Adaptive Virtual Synchronous Control for Grid-Forming Inverters in Renewable Energy Integration[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(5): 5890-5901.