

面向构网型逆变器的改进下垂控制方法及其在多VSC系统中的实现

滕敏亮, 王耀华, 滕晓亮, 田芬芳, 林建豪, 张 巍, 周意诚*

浙江腾腾电气有限公司, 浙江 温州

收稿日期: 2026年5月4日; 录用日期: 2026年6月23日; 发布日期: 2026年7月7日

摘 要

针对构网型逆变器在电压支撑与多机协同运行中的控制需求, 提出一种面向电压指令量精确跟踪的改进下垂控制方法, 并进一步将其推广到多电压源变流器(VSC)并联系统。该方法以传统下垂控制为基础, 围绕VSC控制中关键电压指令量 V_{od} 的跟踪误差展开改进: 首先构造基于输出误差反馈的改进下垂控制结构, 在此基础上进一步引入PID环节以提升指令电压跟踪精度和动态支撑能力。基于MATLAB/Simulink与Simscape平台建立单VSC与多VSC仿真模型, 对传统下垂控制、无PID改进下垂控制和带PID改进下垂控制进行了对比分析。结果表明: 在单VSC场景下, 所提方法可使 V_{od} 对参考电压 V_{odref} 的跟踪误差由传统下垂控制下约0.7 V减小到约0.4 V, 并在引入PID后实现近似无静差跟踪; 在三VSC并联系统中, 所提方法在负荷切换工况下仍能保持较好的电压支撑效果, 使各VSC输出电压幅值更准确地跟踪指定值。进一步讨论表明, 由于该方法仅在传统下垂控制外增加一个误差反馈PID环节, 不需要额外通信链路, 因此在数字控制硬件上具有较好的工程可实现性。

关键词

构网型逆变器, 电压源变流器, 下垂控制, PID控制, 电压支撑, 多VSC系统

Improved Droop Control Method for Grid-Forming Inverters and Its Implementation in Multiple-VSC Systems

Minliang Teng, Yaohua Wang, Xiaoliang Teng, Fenfang Tian, Jianhao Lin, Wei Zhang, Yicheng Zhou*

Zhejiang TTN Electric Co., Ltd., Wenzhou Zhejiang

Received: May 4, 2026; accepted: June 23, 2026; published: July 7, 2026

*通讯作者。

文章引用: 滕敏亮, 王耀华, 滕晓亮, 田芬芳, 林建豪, 张巍, 周意诚. 面向构网型逆变器的改进下垂控制方法及其在多VSC系统中的实现[J]. 传感器技术与应用, 2026, 14(4): 648-658. DOI: 10.12677/jsta.2026.144063

Abstract

To improve voltage-support performance and multi-converter coordination of grid-forming inverters, an improved droop control method oriented to accurate tracking of the key voltage command V_{od} is presented and further extended to multiple voltage source converters (VSCs). On the basis of conventional droop control, the proposed method improves the tracking performance of the key voltage command V_{od} in VSC control. Specifically, an improved droop control structure based on output error feedback is first constructed, and a PID link is further introduced to enhance the tracking accuracy of the command voltage and the dynamic support capability. Single-VSC and multi-VSC simulation models are established in MATLAB/Simulink and Simscape to compare conventional droop control, the modified droop control without PID, and the modified droop control with PID. Results show that, in the single-VSC case, the tracking error of V_{od} with respect to V_{odref} is reduced from about 0.7 V under conventional droop control to about 0.4 V after error-feedback compensation, and nearly zero steady-state error is achieved after introducing PID. In the three-VSC parallel system, the proposed method still maintains good voltage support under load-switching conditions, and the output voltage amplitudes of each VSC can track their specified values more accurately. Further discussion indicates that, since the proposed method only adds an error-feedback PID link outside the conventional droop control and does not require additional communication links, it has good engineering implementability on digital control hardware.

Keywords

Grid-Forming Inverter, Voltage Source Converter, Droop Control, PID Control, Voltage Support, Multiple-VSC System

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着光伏、风电和储能等分布式电源的大规模接入,传统依赖同步发电机提供惯量、电压支撑与频率支撑的运行模式正在发生明显变化。构网型逆变器由于能够主动建立电压和频率,已成为新型电力系统和微电网中的关键接口装备[1]。围绕逆变器下垂控制及其改进问题,已有研究从统一建模、分布式微电网实现、经典控制器耦合以及控制稳定性改善等方面开展了系统讨论[2]-[7]。进一步看,已有研究在下垂控制应用于构网型逆变器和并联系统时,主要形成了以下几类思路:一类关注下垂控制的统一建模与小信号稳定性分析,旨在解释线路阻抗、功率耦合和控制参数对系统动态特性的影响;一类关注分层控制结构,将下垂控制与二次电压/频率恢复、功率分配优化结合,以提升多机协同运行性能;还有一类研究则尝试在传统下垂控制外引入虚拟阻抗、附加阻尼或经典控制器补偿,以改善电压支撑精度和扰动恢复性能。上述研究为构网型逆变器控制提供了重要基础,但针对本文所关注的关键中间变量 V_{od} 跟踪问题,现有文献仍较少从“局部误差反馈补偿”的角度展开系统论证,尤其缺少由单 VSC 到多 VSC 并联系统的连续验证链条。在构网型控制方法中,下垂控制因不依赖高速通信、实现简单且具备一定分布式协调能力,仍然是多 VSC 并联系统中的代表性基础方法。

进一步看,围绕并联逆变器与孤岛微电网自主运行问题,已有研究较早从三相下垂控制策略、并联系统功率分配以及逆变器型微电网的小信号建模与实验验证等方面奠定了基础。其中,Loix 等提出了适

用于并联逆变器的三相电压与频率下垂控制方案, Pogaku、Prodanović 和 Green 则对逆变器型微电网的自主运行进行了建模、分析与实验测试, Guerrero 等进一步提出了下垂控制微电网的分层控制框架, 为后续多机协调控制与标准化研究提供了重要基础[8]-[10]。

近年来, 随着构网型逆变器在新型电力系统中的作用不断增强, 研究重点又逐步从传统下垂控制扩展到更广义的微电网控制体系和构网型控制方法综述。Hossain 等系统回顾了交流微电网中逆变器接口分布式电源的控制方法, NERC 发布的白皮书从电力系统可靠性角度总结了构网型技术的发展背景与工程关注点, Unruh 等则对构网型逆变器的主要控制方法进行了专门综述[11]-[13]。这些研究为理解下垂控制、构网型控制及其工程应用之间的关系提供了较完整的背景, 也说明在现有基础上进一步聚焦某一关键控制量并开展改进研究具有现实意义。

在上述研究基础上, 作者前期工作进一步聚焦于 Vod 指令量的控制精度问题。文献[14]围绕单 VSC 场景提出了改进下垂控制思想, 重点讨论了传统下垂控制、无 PID 误差反馈改进下垂控制和带 PID 补偿的改进下垂控制三类方法, 并在单逆变器仿真模型中验证了 Vod 跟踪精度的改善。进一步地, 文献[15]将带 PID 补偿的改进思路推广到多 VSC 并联系统, 对负荷切换工况下的多机电压支撑能力进行了仿真验证。

与作者前期工作相比, 本文的整理与深化主要体现在三个方面: 其一, 将文献[14]与文献[15]统一到“面向构网型逆变器的改进下垂控制”这一更完整的技术主线中, 形成由单机方法提出到多机扩展验证的连续论证框架; 其二, 在中文期刊写作语境下, 补充传统下垂控制机理、方法实现思路、图表说明和工程意义分析, 使论文逻辑更加完整; 其三, 围绕工程可实现性增加讨论, 指出该方法仅在传统下垂控制基础上增加一个误差反馈 PID 环节, 硬件实现复杂度相对较低。

因此, 本文以文献[14]和文献[15]为基础, 对相关研究进行系统整合, 开展系统梳理与拓展研究。全文重点包括: 分析传统下垂控制及其局限; 构建带误差反馈和 PID 补偿的改进下垂控制结构; 在单 VSC 与多 VSC 系统中开展仿真验证; 并讨论本文方法与作者前期工作的关系、差异及工程实现特点。

2. VSC 控制结构与传统下垂控制原理

2.1. VSC 控制结构

VSC 是微电网中连接分布式电源与交流系统的重要接口。对于构网型逆变器而言, 其控制目标不仅是完成直流到交流的能量变换, 更重要的是在一定程度上形成并维持交流母线电压和频率[1]。实际控制中通常采用基于 d_q 坐标系的双闭环结构, 即外层电压控制与内层电流控制相结合, 以提高系统的动态性能和稳态精度[4]。在该控制体系中, V_{od} 既是下垂控制模块的输出, 也是电压控制器的重要输入, 因此可视为连接“功率外特性调节”与“内部电压控制”的关键中间变量。

2.2. 传统下垂控制原理

传统下垂控制来源于同步发电机外特性的等效思想, 可通过有功—频率和无功—电压两条通道实现分布式协调控制[2] [3]。其基本表达式为:

$$\omega = \omega^* - m^p (P - P^*) \quad (1)$$

$$E = E^* - n^q (Q - Q^*) \quad (2)$$

式中, P 与 Q 分别为 VSC 输出有功功率和无功功率, P^* 与 Q^* 分别为其参考值, m^p 与 n^q 分别为 P- ω 和 Q-V 通道的下垂系数, ω^* 与 E^* 分别为额定频率和额定电压幅值。对于构网型逆变器而言, Q-V 通道与输出电压支撑性能直接相关, 因此也是本文重点关注的对象。

2.3. 传统下垂控制的局限

尽管传统下垂控制具有结构简单和工程易用等优点，但其电压支撑精度受到一定限制。作者前期单 VSC 研究表明，在约 311 V 工作点附近，传统下垂控制虽能实现 V_{od} 对 V_{odref} 的基本跟踪，但仍存在约 0.7 V 的稳态误差[14]。在多 VSC 并联系统中，这种误差可能进一步影响各机输出电压质量与系统协同效果[15]。因此，有必要在保持传统下垂控制基本框架的前提下，引入更直接的电压误差补偿机制。

3. 改进下垂控制方法设计

3.1. 改进思路

文献[14]提出的核心思路，是围绕 V_{od} 指令量的跟踪误差构造二次补偿机制。传统下垂控制提供基本的 Q-V 调节趋势，而新增的误差反馈环节则根据目标值与实际输出之间的偏差，对 V_{od} 进行再次修正。若仅采用误差反馈，不引入 PID 控制器，则形成无 PID 改进下垂控制；若在误差反馈基础上进一步加入 PID 控制器，则形成带 PID 补偿的改进下垂控制[14]。这种改进方式不改变传统下垂控制的主体结构，便于由现有控制系统平滑升级。单 VSC 场景下的具体控制结构见图 1。

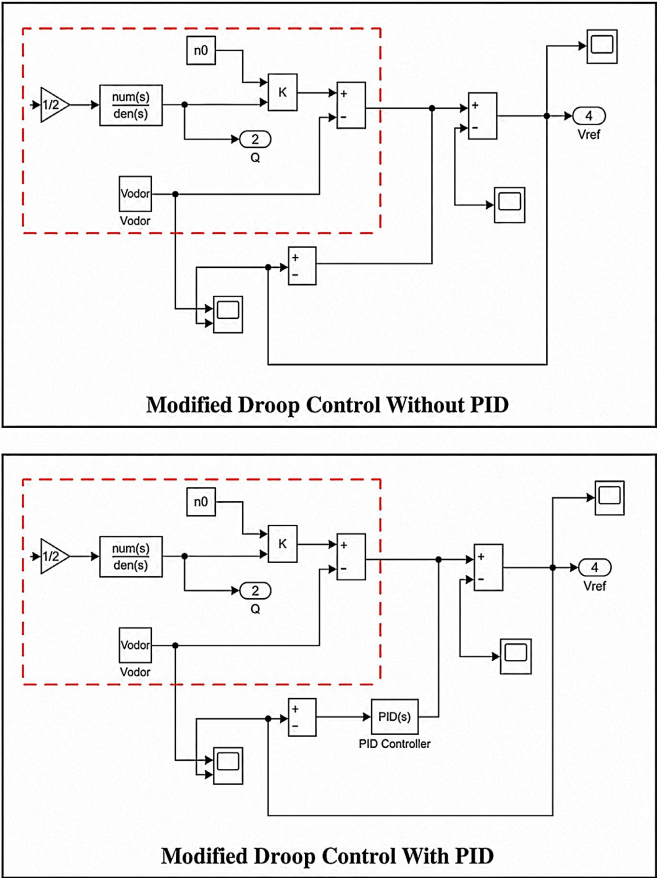


Figure 1. Improved droop control structure in the single-VSC scenario (adapted from Ref. [14])
图 1. 单 VSC 场景下的改进下垂控制结构(根据文献[14]整理)

3.2. 数学表达

设电压误差信号为

$$e_v(t) = V_{od_ref}(t) - V_{od}(t) \quad (3)$$

则 PID 补偿项可写为

$$u_{PID}(t) = K_p e_v(t) + K_i \int e_v(t) dt + K_d \frac{de_v(t)}{dt} \quad (4)$$

于是, 带 PID 的改进下垂控制输出可表示为

$$V_{od'}(t) = V_{od_droop}(t) + u_{PID}(t) \quad (5)$$

其中, $V_{od_droop}(t)$ 为传统下垂控制输出, K_p 、 K_i 和 K_d 分别为比例、积分和微分系数。与复杂的二次协调控制或依赖通信的集中式控制相比, 该方法只在原有控制回路外增加一个局部误差反馈 PID 环节, 因此结构更紧凑, 保留了下垂控制分布式实现的优点[2] [6] [7]。

3.3. PID 参数整定策略与参数敏感性分析

为保证改进下垂控制在单 VSC 与多 VSC 系统中均具有较好的动态性能与稳态精度, PID 参数需要结合被控对象特性进行整定。本文中, PID 环节的控制目标并非直接调节交流侧输出电压本身, 而是对关键电压指令量 V_{od} 与参考值 V_{odref} 之间的误差进行补偿。因此, 其整定原则应围绕“快速抑制误差、避免过冲过大、减小稳态偏差和抑制噪声放大”展开。

结合本文系统特点, 采用一种工程上较易实现的“两步整定法”。首先, 在令 $K_i=0$, $K_d=0$ 的条件下, 仅调整比例系数 K_p , 使系统在负荷切换时能够较快收敛, 同时避免明显振荡; 随后在固定 K_p 的基础上逐步增加积分系数 K_i , 以减小稳态误差并提高对参考电压的跟踪精度。考虑到微分环节对采样噪声和高频扰动较敏感, 且本文仿真对象以电压支撑和稳态跟踪为主, 因此本文采用 $K_d=0$ 的 PI 型实现方式。

从物理意义上看, K_p 主要决定误差出现后控制器的即时修正强度。 K_p 取值过小, 则 V_{od} 对参考值变化和扰动响应较慢; K_p 过大, 则容易在多 VSC 并联场景下引入更明显的暂态摆动。 K_i 主要决定稳态误差的消除能力, 其取值越大, 系统消除静差的能力越强, 但同时也更容易带来积分累积过快、暂态超调增大甚至低频振荡。对于 PI 控制器而言, K_p/K_i 的比值可理解为积分作用相对于比例作用的时间尺度: 该比值越小, 积分作用越强, 系统越倾向于快速消除静差; 该比值越大, 则系统更强调比例快速响应而弱化积分累积。

为考察参数偏离最优值时系统性能的变化, 本文进一步进行了参数敏感性分析。以额定工况和负荷切换工况为对象, 分别考察 K_p 与 K_i 在基准值附近变化时 V_{od} 跟踪误差、调节时间和过冲量的变化规律。结果表明: 当 K_p 低于基准值时, 系统动态响应变慢, 扰动后恢复时间延长; 当 K_p 高于基准值较多时, 尽管初始响应加快, 但电压暂态波动加剧。对于 K_i , 适度提高有助于减小稳态误差, 但过大的 K_i 会使系统在负荷突变时出现更明显的超调。综合动态与稳态性能, 本文所采用的参数组合在本文仿真系统中能够在响应速度、误差抑制和控制稳定性之间取得较为合理的折中。

需要指出的是, 本文参数整定结果对应于当前滤波参数、负荷条件和下垂系数设置。当系统容量等级、线路阻抗或并联系统规模发生变化时, PID 参数仍需重新校核。因此, 本文更强调一种可复用的整定思路, 而不是将某一组参数视为普适最优解。

4. 单 VSC 仿真实验验证

4.1. 仿真模型与对比方案

单 VSC 仿真基于 MATLAB/Simulink 与 Simscape 搭建, 在已有 VSC 基础模型上分别实现传统下垂控制、无 PID 改进下垂控制和带 PID 改进下垂控制三种方案[14]。该部分研究的目标是验证所提方法对关键电压指令量 V_{od} 的跟踪改善效果。

4.2. 结果分析

图 2 给出了单 VSC 场景下三种控制方法的 V_{od} 跟踪结果。可以看出,传统下垂控制下 V_{od} 与 V_{odref} 之间存在较明显偏差;在加入一次误差反馈后,偏差进一步减小;而在误差反馈基础上引入 PID 补偿后, V_{od} 基本可以贴近参考值运行。按照文献[14]的结果,误差大致由传统下垂控制下约 0.7 V 减小到无 PID 改进下垂控制下约 0.4 V,并在带 PID 控制时接近无静差跟踪。

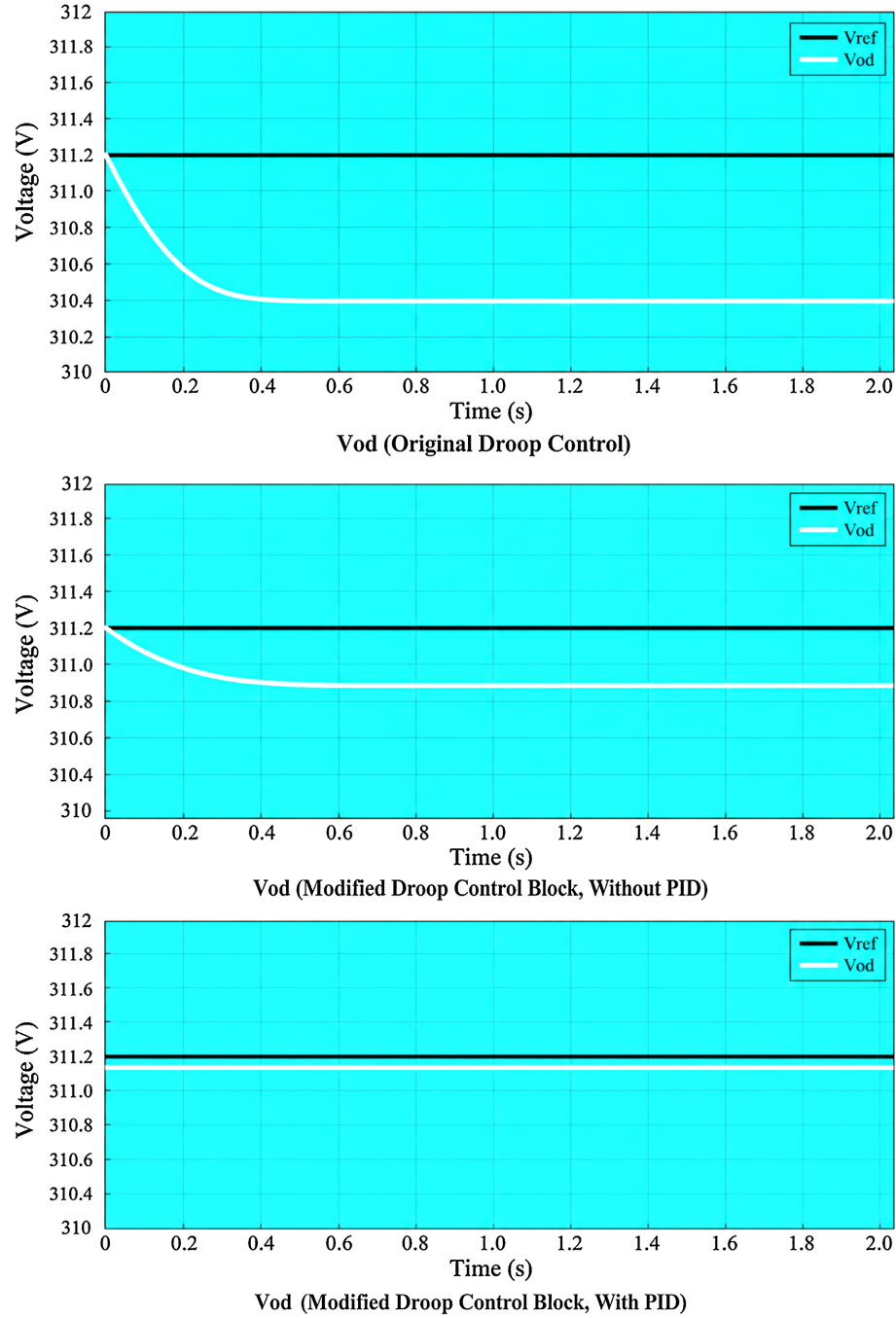


Figure 2. V_{od} tracking results of different control methods in the single-VSC scenario (adapted from Ref. [14])
图 2. 单 VSC 场景下不同控制方法的 V_{od} 跟踪结果(根据文献[14]整理)

此外,文献[14]还给出了带 PID 改进下垂控制下的三相输出电压波形,如图 3 所示。与传统下垂控制相比,不同方法在波形整体形态上差异不大,但在输出电压幅值的准确性方面存在明显区别。这说明所提方法的主要优势并不在于改变波形形状,而在于更准确地将目标电压支撑到指定幅值。

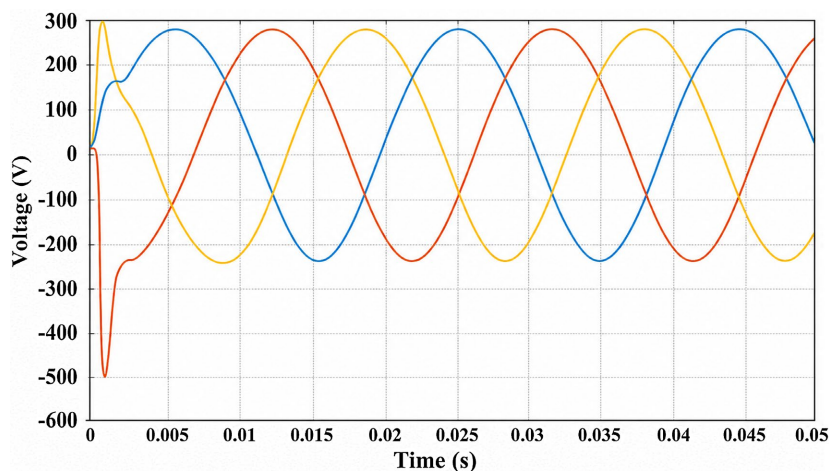


Figure 3. Three-phase output voltage waveforms under the modified droop control with PID in the single-VSC scenario (adapted from Ref. [14])

图 3. 单 VSC 场景下带 PID 改进下垂控制的三相输出电压波形(根据文献[14]整理)

从作者前期工作角度看,文献[14]的主要贡献是提出改进下垂控制的基本思想并在单机系统中完成初步验证,其侧重点在于“方法提出”和“单机可行性证明”。本文在此基础上并不局限于单机结果,而是继续引入多 VSC 扩展验证,从而形成更完整的研究链条。

5. 多 VSC 系统实现与仿真分析

5.1. 系统结构与参数

在文献[15]中,作者将前述带 PID 改进下垂控制方法推广到三台 VSC 组成的并联系统。该系统共协调向五组 RLC 负荷供电,在 VSC1 与 VSC2 之间、VSC2 与 VSC3 之间分别设置三相串联 RLC 支路,并在 VSC3 至 Load5 之间设置三相断路器,以便考察不同工况下的系统动态行为。图 4 给出了多 VSC 系统主结构。

系统额定线电压为 380 V,额定频率为 50 Hz; Load1、Load2 与 Load5 的有功功率均为 5.8 kW、感性无功均为 0.2 kvar, Load3 为 2.3 kW/0.3 kvar, Load4 为 6.3 kW/1.0 kvar; 两段串联支路参数为 $R = 0.15 \Omega$ 、 $L = 3.5 \times 10^{-4} \text{ H}$; 断路器动作时间为 1~2 s; 下垂系数取 $m_p = 5 \times 10^{-5}$ 、 $n_q = 3 \times 10^{-3}$, PID 参数为 $K_p = 100$ 、 $K_i = 1$ 、 $K_d = 0$ 。主要仿真参数如表 1 所示。

其中, PID 参数采用第 2.3 节所述工程整定方法确定,最终取 $K_p = 100$, $K_i = 1$, $K_d = 0$,以兼顾单机跟踪精度、多机扰动下的动态平稳性以及实现复杂度。

5.2. 多机工况下的结果比较

在多 VSC 系统中,文献[15]分别比较了传统下垂控制与带 PID 改进下垂控制在负荷切换工况下的性能差异。图 5 给出了两类方法下各 VSC 的 V_{od} 变化情况。可以看出,在传统下垂控制下, V_{od1} 、 V_{od2} 和 V_{od3} 在 1~2 s 断路器动作期间出现较明显偏差,其中 V_{od1} 约存在 1 V 左右误差, V_{od3} 约存在 1.5 V 左右误差;而在带 PID 改进下垂控制下,各 VSC 的 V_{od} 能够更紧密地贴近参考值[15]。

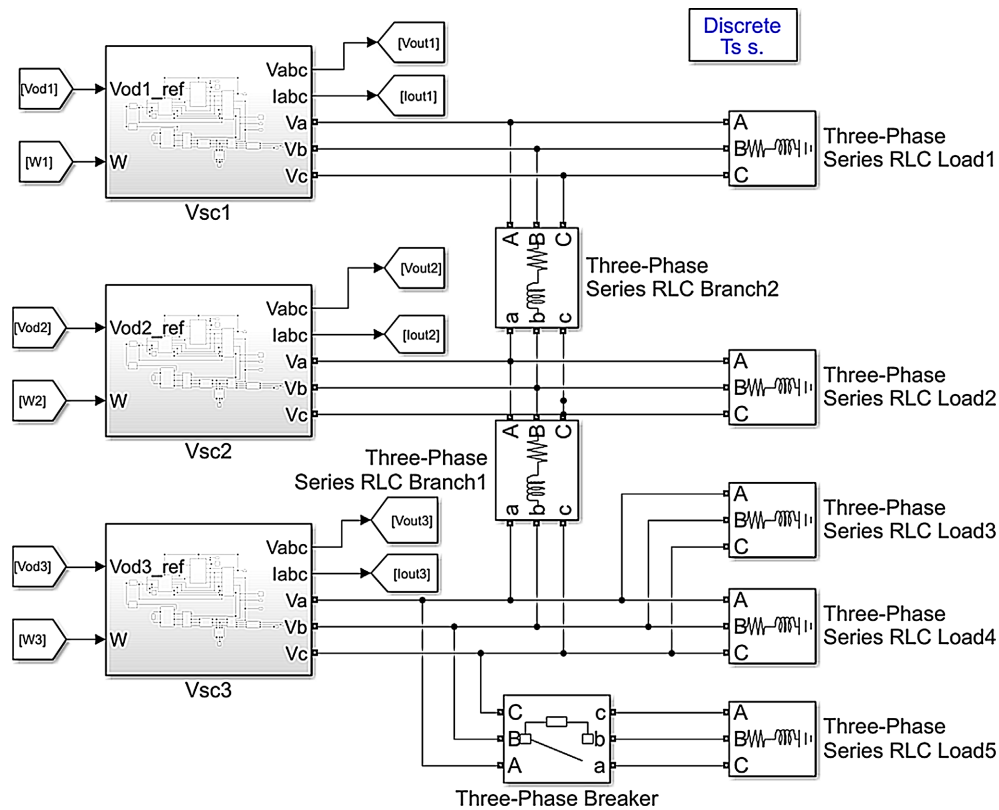


Figure 4. Main structure of the multiple-VSC system (adapted from Ref. [15])
图 4. 多 VSC 系统主结构(根据文献[15]整理)

Table 1. Main simulation parameters of the multiple-VSC system
表 1. 多 VSC 系统主要仿真参数

类别	项目	参数值
系统额定值	额定线电压/额定频率	380 V/50 Hz
负荷参数	Load1、Load2、Load5	有功 5.8 kW；感性无功 0.2 kvar
负荷参数	Load3	有功 2.3 kW；感性无功 0.3 kvar
负荷参数	Load4	有功 6.3 kW；感性无功 1.0 kvar
支路参数	两段三相串联 RLC 支路	$R = 0.15 \Omega$; $L = 3.5 \times 10^{-4} \text{ H}$
开关工况	三相断路器动作时间	1 s ~ 2 s
下垂参数	P- ω /Q-V 系数	$m^p = 5 \times 10^{-5}$; $n^q = 3 \times 10^{-3}$
PID 参数	控制器参数	$K_p = 100$; $K_i = 1$; $K_d = 0$

图 6 给出了三台 VSC 的三相输出电压波形比较结果。与图 5 一致，当采用带 PID 的改进下垂控制时，各 VSC 的输出电压幅值更接近指定值，且在扰动工况下仍保持较为平稳的波形特征[15]。这说明 PID 补偿对电压支撑的改进，不仅体现在中间控制量 Vod 上，也体现在最终交流输出电压上。

需要指出的是，文献[15]还给出了各 VSC 无功分配结果，表明在总无功支撑水平基本一致的情况下，不同 VSC 承担的无功功率可以出现差异。换言之，所提方法并不是简单地增加无功总量，而是通过更合理的局部补偿使各 VSC 在保持总支撑能力的同时，实现更准确的电压控制。

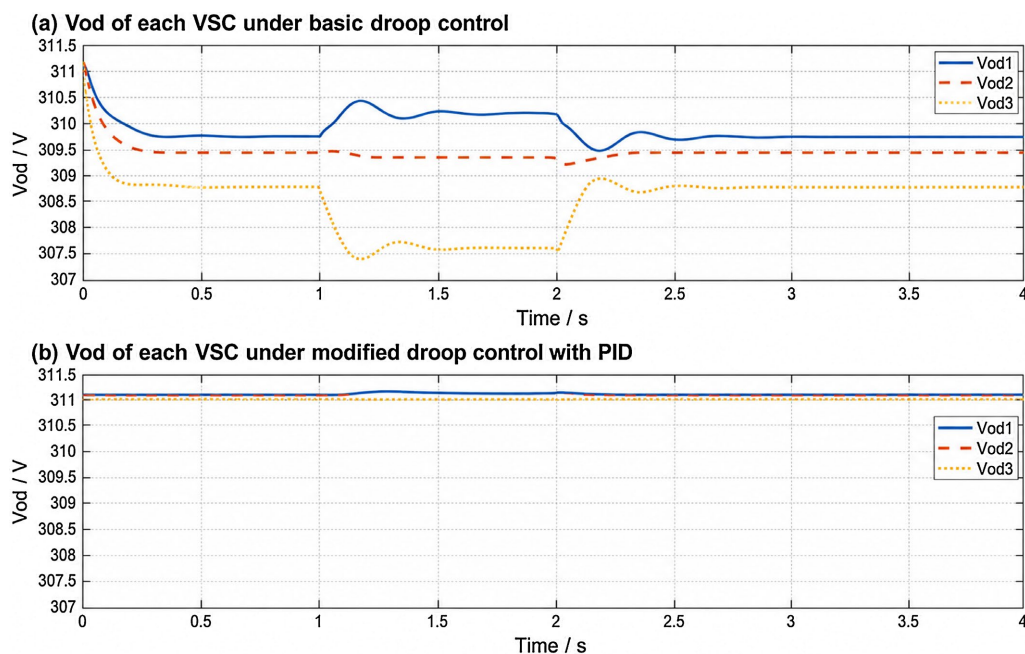


Figure 5. Vod comparison between conventional droop control and modified droop control with PID in the multiple-VSC system (adapted from Ref. [15])

图 5. 多 VSC 系统中传统下垂控制与带 PID 改进下垂控制的 Vod 比较(根据文献[15]整理)

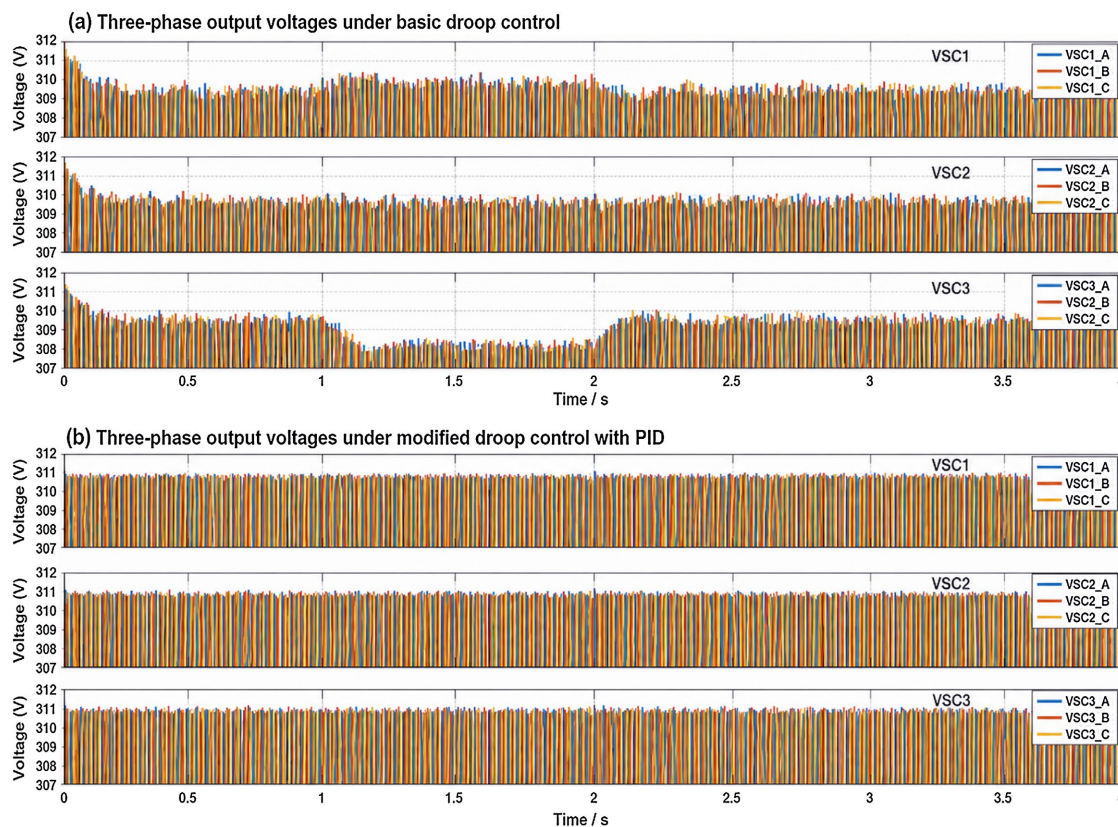


Figure 6. Three-phase output voltage comparison between conventional droop control and modified droop control with PID in the multiple-VSC system (adapted from Ref. [15])

图 6. 多 VSC 系统中传统下垂控制与带 PID 改进下垂控制的三相输出电压比较(根据文献[15]整理)

通过对图 5 的进一步分析显示,在多 VSC 并联运行条件下,传统下垂控制下各变流器的 V_{od} 在负荷切换期间出现了不同程度的偏离。这一现象的根源在于:传统下垂控制主要依赖局部功率测量形成等效外特性,其本身并不直接校正中间电压指令量的偏差,因此在负荷突变和功率重新分配过程中, V_{od} 的误差会在一定时间内保留。引入 PID 误差反馈后,各 VSC 均能基于自身局部误差信号进行附加修正,从而更快抑制指令偏差并改善电压支撑一致性。

进一步结合图 6 可见,带 PID 改进下垂控制下三台 VSC 的交流输出电压在扰动期间保持了更稳定的幅值。这说明 PID 环节并未破坏下垂控制原有的分布式协调特性,而是在其外层增加了局部精确补偿能力。尤其在多机系统中,这种局部补偿可减弱由于线路阻抗、负荷位置和功率分配差异所导致的电压偏差累积,因此更适合用于需要较高电压支撑精度的构网型并联系统。

6. 与作者前期工作的关系、区别及工程实现讨论

6.1. 与文献[14]、[15]的关系与区别

本文与作者前期工作的关系可概括为“继承、整合与提升”。其中,文献[14]是本文的直接基础,主要解决单 VSC 场景下改进下垂控制的提出与初步验证问题;文献[15]则在文献[14]基础上面向多 VSC 并联系统完成方法扩展与实现。本文并非简单重复前述两篇论文,而是对其进行统一整理,使其形成由理论动机、方法设计、单机验证到多机实现的完整链条。

从区别上看,文献[14]更强调“方法概念”和“单逆变器结果”,属于前期探索性工作;文献[15]更强调“实现扩展”和“多机仿真验证”,属于后续应用性工作。本文则是在两者之间建立清晰衔接:首先明确单机研究为何必要,其次说明多机扩展如何承接前述方法,最后在中文期刊框架下补充了工程意义、图表整理与引文说明。因而,本文的创新性更多体现在研究成果的系统化表达与完整技术论证上。

6.2. 硬件实现可行性分析

从控制实现角度看,本方法在提高控制精度的同时,并未显著增加控制结构复杂度。其核心改动仅是在传统下垂控制输出之外增加一个基于 V_{od} 误差的 PID 反馈环节,不需要引入额外通信链路、集中协调器或复杂状态观测器。因此,与需要广域通信或多层控制架构的方案相比,该方法更适合在 DSP、FPGA、MCU 或工业控制器等常见数字控制平台上实现。

当然,“较易实现”并不意味着可以忽略工程细节。实际硬件落地时,仍需考虑采样噪声、功率计算滤波延时、PID 参数整定、输出限幅以及积分饱和等问题。尤其在多 VSC 场景下,各台控制器的采样同步性和参数一致性也会影响实际效果。因此,本文更准确的表述应为:所提方法在硬件上具有较好的可实现性和较低的额外实现代价,但在工程应用前仍需通过实时仿真和控制器在环实验进一步验证。

7. 结论

本文基于作者前期成果,对面向构网型逆变器的改进下垂控制方法进行了系统整理,形成了由单机方法提出到多机系统实现的完整技术路线。研究结果表明:传统下垂控制能够实现基本电压支撑功能,但在 V_{od} 跟踪方面存在一定误差;通过引入误差反馈,可在不改变下垂控制基本框架的前提下降低稳态偏差;进一步引入 PID 补偿后,单 VSC 场景下可实现近似无静差跟踪;在多 VSC 并联系统中,该方法在负荷切换工况下仍表现出较好的电压支撑能力和输出电压稳定性。由于该方法仅增加一个局部 PID 反馈环节,其数字硬件实现难度相对较低,具有一定工程应用潜力。后续工作可继续面向实时仿真、硬件在环实验以及更复杂微电网场景开展验证。

参考文献

- [1] Lin, Y., Johnson, B.B., Mathieu, J., *et al.* (2020) Research Roadmap on Grid-Forming Inverters. NREL/TP-5D00-73476.
- [2] Tayab, U.B., Roslan, M.A.B., Hwai, L.J. and Kashif, M. (2017) A Review of Droop Control Techniques for Microgrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **76**, 717-727. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.028>
- [3] Yan, Z., Zhang, C. and Chen, X. (2019) Unified Model for Droop Control Inverters Operated in Microgrid. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **227**, Article ID: 032015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/227/3/032015>
- [4] Fan, L. (2017) Control and Dynamics in Power Systems and Microgrids. CRC Press.
- [5] Sheikh, M.T. (2022) Droop Control in Decentralized Inverter-Based AC Microgrid. MATLAB Central File Exchange.
- [6] Firdaus, A. and Mishra, S. (2020) Mitigation of Power and Frequency Instability to Improve Load Sharing among Distributed Inverters in Microgrid Systems. *IEEE Systems Journal*, **14**, 1024-1033. <https://doi.org/10.1109/jsyst.2019.2920018>
- [7] Gurugubelli, V., Ghosh, A. and Panda, A.K. (2022) Droop Controlled Voltage Source Converter with Different Classical Controllers in Voltage Control Loop. 2022 *IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy (PESGRE)*, Trivandrum, 2-5 January 2022, 1-6. <https://doi.org/10.1109/pesgre52268.2022.9715907>
- [8] Loix, T., De Brabandere, K., Driesen, J. and Belmans, R. (2007) A Three-Phase Voltage and Frequency Droop Control Scheme for Parallel Inverters. *IECON 2007-33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 5-8 November 2007, 1662-1667. <https://doi.org/10.1109/iecon.2007.4460216>
- [9] Pogaku, N., Prodanovic, M. and Green, T.C. (2007) Modeling, Analysis and Testing of Autonomous Operation of an Inverter-Based Microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **22**, 613-625. <https://doi.org/10.1109/tpe.2006.890003>
- [10] Guerrero, J.M., Vasquez, J.C., Matas, J., de Vicuna, L.G. and Castilla, M. (2011) Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach toward Standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **58**, 158-172. <https://doi.org/10.1109/tie.2010.2066534>
- [11] Hossain, M.A., Pota, H., Issa, W. and Hossain, M. (2017) Overview of AC Microgrid Controls with Inverter-Interfaced Generations. *Energies*, **10**, Article No. 1300. <https://doi.org/10.3390/en10091300>
- [12] North American Electric Reliability Corporation (NERC) (2021) Grid Forming Technology: Bulk Power System Reliability Considerations. NERC.
- [13] Unruh, P., Nuschke, M., Strauß, P. and Welck, F. (2020) Overview on Grid-Forming Inverter Control Methods. *Energies*, **13**, Article No. 2589. <https://doi.org/10.3390/en13102589>
- [14] Zhou, Y., She, J., Yokoyama, R. and Nakanishi, Y. (2023) Modified Droop-Based Control and Its Implementation for Grid-Forming Inverter. *The International Council on Electrical Engineering Conference 2023 (ICEE 2023)*, 2-6 July 2023.
- [15] Zhou, Y. and Yokoyama, R. (2024) Modified Droop Control for Support System Voltage with PID and Its Implementation to Multi-VSCs for GFM Inverter. 2023 *Power Electronics and Power System Conference (PEPSC)*, Hangzhou, 24-26 November 2023. <https://doi.org/10.1109/PEPSC58749.2023.10395522>