

并联改进 VSG 功率环流的分析与抑制策略研究

周子淳^{1,2}, 何国锋^{1,2}, 董燕飞^{1,2}, 林俊芳^{1,2}

(1.三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2.河南城建学院 电气与控制工程学院, 河南 平顶山 467036)

摘要: 为了抑制孤岛模式下光伏微电网逆变器之间由于输电线路阻抗差异所引起的环流问题, 文章提出了一种用于多逆变器并联系统的改进的虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)控制策略。首先, 基于传统的 VSG 控制框图, 通过引入线路功率反馈环节, 使每台逆变器分别抵消其输电线路上的功率损耗, 以提高有功、无功功率均分精度, 并降低输出电压跌落, 改善电能质量; 然后, 通过引入同步控制器, 减小逆变器并联瞬间的电流冲击, 降低多逆变器并联系统之间的瞬时环流; 最后, 通过仿真与实验验证了所提控制策略的有效性。

关键词: 孤岛模式; 多逆变器并联系统; 虚拟同步发电机; 环流抑制

中图分类号: TK81 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)10-1363-08

0 引言

由风力发电、光伏组成的微电网, 以其灵活性、环保性等优点而迅速发展^[1-3]。微电网具有孤岛模式和并网模式。并网逆变器作为可再生能源发电单元与电网之间的接口, 将可再生能源发电传输到电网。然而, 逆变器作为电子装置, 其本身没有惯性, 无法解决由可再生能源的随机性和波动性所引起的频率和电压变化, 严重影响电网的安全稳定运行^[4-6]。

VSG 控制策略可以通过模拟同步发电机的转子惯性和下垂特性, 增加系统惯性, 实现分布式逆变电源同步化^[7,8]。当 VSG 运行在孤岛模式时, 多台分布式电源通过逆变器之间的并联提高了系统的容量。但是, 由于每台逆变器输电线路长度的不同所导致的线路阻抗间的差异会影响逆变器之间功率均分的精度, 从而引发环流, 危害分布式逆变电源中的设备^[9]。为了改善上述问题, 通过建立额外的控制环路来重塑逆变器输出线路阻抗的虚拟阻抗技术被广泛研究。目前, 虚拟阻抗方法主要包括 3 类: 虚拟电阻技术、虚拟电感技术、虚拟复阻抗技术^[10-15]。文献[10]通过引入虚拟负电阻来抵消线路电阻的影响。虽然通过增加感性分量提高了功率分配性能, 但系统阻尼因子会降低, 系统稳定性会受到极大的影响。文献[12,13]通过结合虚

拟电感和频率下垂控制器, 在不影响分布式电源输出电压的情况下缓解了功率分配误差。然而, 这些方法忽略了线路电阻的影响, 在复杂的线路阻抗中性能无法保证。文献[14]基于功率均分的误差, 自适应地调整虚拟复阻抗的大小, 实现功率的均分。但其实现复杂, 需要有较高可靠性的通信网络, 且存在较大的电压跌落。虽然上述文献都对并网逆变器之间的功率均分效果进行改善, 却忽略了虚拟阻抗技术会降低系统的动态响应的问题^[16]。

本文结合传统 VSG 技术, 通过引入输电线路功率反馈环节, 改变每台逆变器的功率参考值, 从而间接地改变每台逆变器的参考电压幅值和相角, 分别抵消每台逆变器自身的输电线路阻抗的功率损耗, 实现功率均分、抑制逆变器之间的环流, 且此方法不会影响原系统的动态响应能力。通过结合同步控制器, 降低逆变器并联瞬间的瞬时环流峰值, 维护设备安全。最后, 通过仿真和实验对本文所提控制策略进行验证。

1 系统拓扑

1.1 系统描述

带有两台逆变器的孤岛微电网的单线拓扑结构如图 1 所示。系统包括光伏板、DC/DC 转换器、储能电池、双向转换器、VSG1、VSG2、线路阻抗 Z_{l1}

收稿日期: 2023-10-27。

基金项目: 河南省自然科学基金面上项目(222300420400)。

通信作者: 何国锋(1971-), 男, 博士, 教授, 研究方向为微电网逆变器高效变流器控制、逆变器并联控制。E-mail: dragonhgf@hncj.edu.cn

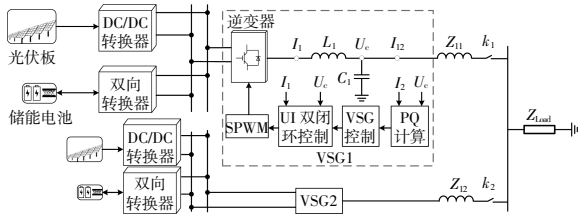


图1 孤岛微电网逆变器框图

Fig.1 Block diagram of islanded microgrid inverter and Z_{12} 、开关 k_1 和 k_2 、公共负载 Z_{load} 。以 VSG1 为例,其内部结构包括逆变器、滤波电感 L_1 、滤波电容 C_1 和相应的控制策略; I_1 为逆变器侧的电感电流; U_e 为 VSG1 的输出电压; I_{12} 为负载侧的电流。

控制策略过程:首先计算有功、无功功率,经过 VSG 控制器生成参考电压指令;然后,为追踪参考电压指令,利用电压电流双闭环控制器生成相应的调制信号;最后,调制信号通过 SPWM 控制器生成逆变器中的开关器件所需要的驱动信号。本文储能电池模块可以很好地维持光伏直流侧电压的恒定,将逆变器直流侧部分等效为一个恒压源,以带有 VSG 控制的并联逆变器系统作为研究对象,方便进行后续的理论分析。

1.2 VSG 控制原理

目前,大多数 VSG 研究主要是将同步发电机二阶数学模型中的机械部分和电磁部分引入到逆变电源的控制策略之中,从而得到 VSG 的有功功率和无功功率的功率环。同步发电机的机械方程为

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D(\omega - \omega_n) \quad (1)$$

式中: J 为转动惯量; T_m 为机械转矩; T_e 为电磁转矩; D 为阻尼系数; ω 为角速度; ω_n 为额定角速度。

当负载的有功功率变化导致频率出现偏差时,同步发电机可以通过调节机械转矩来调整所输出的有功功率,使系统恢复平衡。通过模拟同步发电机的基本机械方程来模拟其暂态特性,为逆变电源提供惯性支撑,VSG 相应的功-频特性方程为

$$J_v \frac{d\omega}{dt} = \frac{P^*}{\omega_n} - \frac{P_o}{\omega_n} - D_p(\omega - \omega_n) \quad (2)$$

式中: J_v 为虚拟转动惯量; P^* 为有功功率参考值, P^*/ω_n 为虚拟机械转矩; P_o 为经测量所得到的有功功率值, P_o/ω_n 为虚拟电磁转矩; D_p 为虚拟阻尼系数,相当于下垂控制中的下垂系数; ω 为电气角速

度; ω_n 为额定电气角速度。

同理,在输出电压出现偏差时,VSG 通过模仿同步发电机的励磁调节功能以及根据无功功率偏差值,对输出电压进行调节,相应的 VSG 无功-电压特性方程为

$$E_m = U_n + k_q(Q^* - Q_o) \quad (3)$$

式中: E_m 为 VSG 虚拟电势; U_n 为 VSG 空载电势; k_q 为电压下垂系数; Q^* 为无功功率参考值; Q_o 为经测量所得到的无功功率值。

上述所建立的 VSG 数学模型,其相应的控制框如图 2 所示。

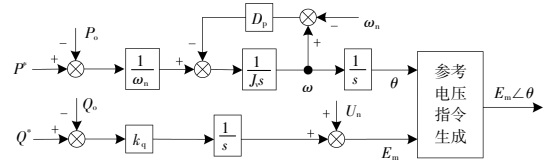


图2 传统 VSG 控制框图

Fig.2 Traditional VSG control block diagram

2 VSG 并联系统分析

2.1 VSG 并联系统功率分析

两台 VSG 并联系统的等效电路图如图 3 所示。

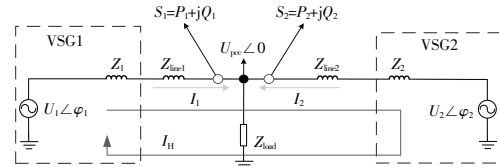


图3 VSG 并联系统等效电路图

Fig.3 Equivalent circuit diagram of VSG parallel system

图中: $U_i \angle \varphi_i$ 、 I_i 、 $Z_i = R_i + jX_i$ 、 Z_{linei} 、 $S_i (i=1, 2)$ 分别为 VSG1 和 VSG2 的等效输出电压、输出电流、等效输出阻抗、线路阻抗、输出复功率; $U_{pcc} \angle 0$ 为公共耦合点电压; I_n 为两台 VSG 之间的环流。

由图 3 可得 VSG 输出的有功、无功功率^[17]表达式为

$$P_i = \frac{R_i(U_i U_{pcc} \cos \varphi_i - U_{pcc}^2) + X_i U_i U_{pcc} \sin \varphi_i}{R_i + X_i^2} \quad (4)$$

$$Q_i = \frac{X_i(U_i U_{pcc} \cos \varphi_i - U_{pcc}^2) - R_i U_i U_{pcc} \sin \varphi_i}{R_i + X_i^2} \quad (5)$$

由式(4)、(5)可以看出,VSG 输出的有功、无功功率与所输出的电压相角、输出的电压幅值以及等效的线路阻抗有关。当 VSG 输出电压、相角通过控制策略达到相同值,而两台 VSG 输电线路

上的等效阻抗大小不匹配时,会严重影响两台 VSG 的功率均分的精度,降低系统鲁棒性。

2.2 VSG 并联系统环流分析

图 3 中,两台 VSG 的复功率、环流表达式分别为

$$S_i = \dot{U}_{pcc} \dot{I}_i^* = P_i + jQ_i \quad (6)$$

$$\dot{I}_H = \frac{\dot{I}_1 - \dot{I}_2}{2} \quad (7)$$

式中: \dot{I}_i^* 为 \dot{I}_i 的共轭复数。

将式(6)带入式(7)化简得:

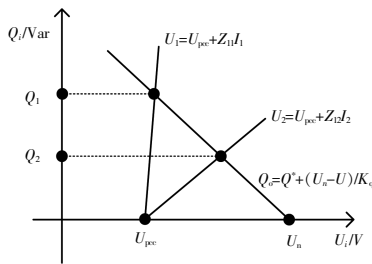
$$\dot{I}_H = \frac{[(P_1 + jQ_1) - (P_2 + jQ_2)]^*}{2U_{pcc}} = \frac{1}{2U_{pcc}} [(P_1 - P_2) - j(Q_1 - Q_2)] \quad (8)$$

由式(8)可以看出,当两台 VSG 输出有功功率不相等时,主要存在有功环流,并且有功环流的大小与两台 VSG 输出的有功功率差值成正比关系。同理,当两台 VSG 输出无功功率不相等时,会引发无功环流,并且无功环流的大小与两台 VSG 输出的无功功率差值成正比关系。通过上述分析,如果要对 VSG 并联系统中的环流进行抑制,则须要控制两台 VSG 输出的有功、无功功率大小,使其输出到负载的功率相等。

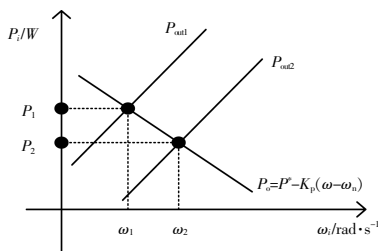
3 所提出的改进 VSG 控制策略分析

3.1 改进的功率控制器分析

图 4 为两台 VSG 线路等效阻抗不匹配时,其



(a)无功-电压下垂曲线



(b)有功-频率下垂曲线

图 4 VSG 并联曲线

Fig.4 VSG parallel curve diagram

无功-电压下垂曲线、有功-频率下垂曲线^[9]。

其中, $U_i, U_{pcc}, Z_{li}, I_i, k_q, k_p (i=1, 2)$ 分别为 VSG 输出电压幅值、公共耦合点处的电压幅值、输电线路阻抗、输出电流、无功下垂系数以及有功下垂系数。

由图 4 可以看出,由于两台 VSG 采取相同控制策略,所以下垂特性方程相同,分别为

$$Q_o = Q^* + (U_n - U_i)/K_q \quad (9)$$

$$P_o = P^* - K_p(\omega - \omega_n) \quad (10)$$

由图 4(a)、式(8)、(9)可以得出,当 $Z_{l1} > Z_{l2}$ 时, $U_1 < U_2, Q_1 > Q_2$,两台 VSG 输出无功功率存在差值,会引发无功环流,且公共耦合点电压幅值存在跌落;同理,由图 4(b)、式(8)、(10)可以得出,当 $Z_{l1} > Z_{l2}$ 时, $P_1 > P_2$,会相应地引发有功环流。

为了提高两台 VSG 之间的功率均分精度,并降低输出电压跌落,提高输出电压质量,本文通过引入线路阻抗功率反馈环节,将滤波电容侧的输出功率与负载侧的输出功率差值补偿给参考功率,间接地改变每台 VSG 的参考电压幅值和相角^[8],使得每台 VSG 分别抵消其线路阻抗的功率损耗,提高 VSG 并联系统之间的功率均分精度,降低输出电压的跌落。改进后的下垂方程分别为

$$Q_o = [Q^* + (Q_c - Q_o)] + (U_n - U_i)/K_q = Q_n + (U_n - U_i)/K_q \quad (11)$$

$$P_o = [P^* + (P_c - P_o)] - K_p(\omega - \omega_n) = P_n - K_p(\omega - \omega_n) \quad (12)$$

式中: $Q_n, P_n (i=1, 2)$ 分别为改进后的无功功率参考值、有功功率参考值。

由式(11)、(12)可以看出,两台 VSG 的下垂特性方程各不相同,当其输电线路阻抗不相同,每台 VSG 分别将线路上的有功、无功损耗补偿给参考有功、无功功率值,自适应地调整每台 VSG 的输出功率,最终实现功率均分。

改进后的 VSG 控制框图如图 5 所示。

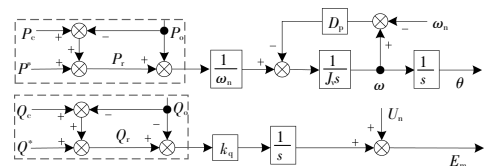


图 5 改进的 VSG 控制框图

Fig.5 Improved VSG control block diagram

图中: P_c, Q_c 分别为滤波电容侧的输出有功、无功功率。

改进后的无功-电压下垂曲线渐进变化、有

功-频率下垂曲线渐进变化情况分别如图 6,7 所示。

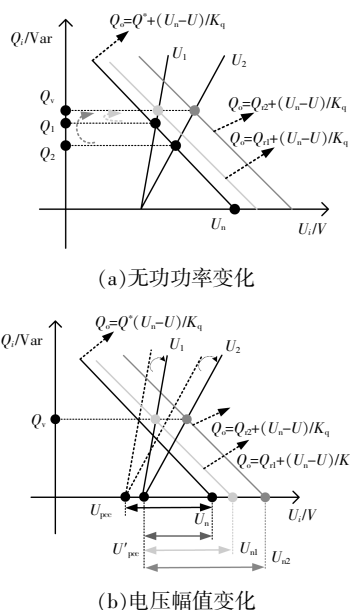


图 6 改进无功-电压下垂曲线

Fig.6 Improved reactive power-voltage droop curve diagram

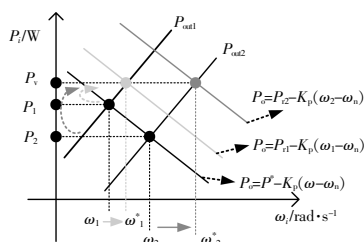


图 7 改进有功-频率下垂曲线

Fig.7 Improved power-frequency droop curve diagram

图中： $Q_{in}, P_{in}, U_{in}(i=1, 2)$ 分别为改进后的无功功率参考值、有功功率参考值、输出电压参考值； U'_{pv}, Q_v, P_v 分别为改进后公共耦合点电压、无功功率均分值和有功功率均分值。由图 6(a)可以看出，每台 VSG 的无功-电压下垂曲线因为无功功率参考值的变化产生不同程度的上移，改变了每台 VSG 输出的无功功率，最终实现无功功率均分；由图 6(b)可以看出，由于线路阻抗上的电压降不会产生太大变化，所以随着每台输出电压参考值的上升，公共耦合点电压也随着增大，使得公共耦合点电压与原输出电压参考值之间的差值逐渐减小，输出电压质量得以改善。由图 7 可以看出，因为有功功率参考值的变化，每台 VSG 的有功-频率下垂曲线也产生不同程度的上移，最终实现有功功率均分。

由以上分析可知，本文提出的改进 VSG 控制策略与传统 VSG 控制相比，其并联时有功功率、无功功率的均分精度得到明显改善，同时输出电压的跌落也进一步减少，输出电能质量得到了改善。

3.2 同步控制器设计

为了减少两台 VSG 并联时的电流冲击，本文通过将两台 VSG 输出的相位差值经 PI 控制器补偿给有功功率环，实现两台 VSG 相位的同步，从而降低并联瞬间的冲击电流。以 VSG2 并入 VSG1 为例，相应的控制方程为

$$\omega_{ref2} = \omega + \frac{k_{pi}s + k_{ii}}{s} (\theta_1 - \theta_2) \quad (13)$$

式中： $\omega_{ref2}, k_{pi}, k_{ii}, \theta_1, \theta_2$ 分别为 VSG2 的参考角频率、PI 控制的比例系数、PI 控制的积分系数、VSG1 输出的相位以及 VSG2 输出的相位。

由式(9)可得出引入同步控制器后的 VSG2 的有功-频率控制框图，如图 8 所示。

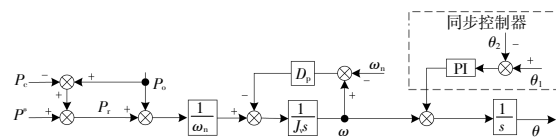


图 8 改进的有功-频率控制框图

Fig.8 Improved active-frequency control block diagram

4 仿真和实验分析

为验证本文所提控制策略的有效性，分别在 Matlab/Simulink 仿真环境和实验室中对两台 15 kV·A 的 VSG 模型进行验证。系统仿真及实验参数如表 1 所示。

表 1 系统参数

Table 1 System parameter

参数	数值
直流侧电压 U_{dc}/V	800
交流电压 U/V	311
滤波电感 L/H	0.005
滤波电感寄生电阻 R_l/Ω	0.03
滤波电容 $C/\mu F$	10
线路阻抗 Z_1/Ω	0.45+0.06j
线路阻抗 Z_2/Ω	0.55+0.07j

4.1 仿真分析

图 9 为采用传统基于虚拟阻抗技术改进的 VSG 控制和本文所提控制下两台并联 VSG 的仿真结果。负载有功、无功功率分别为 6 kW、1 kVar。第 1 台 VSG 独立运行 0.5 s 后，接入第 2 台 VSG。

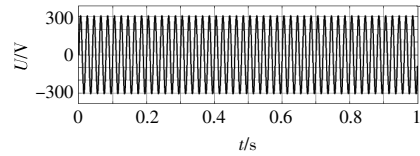
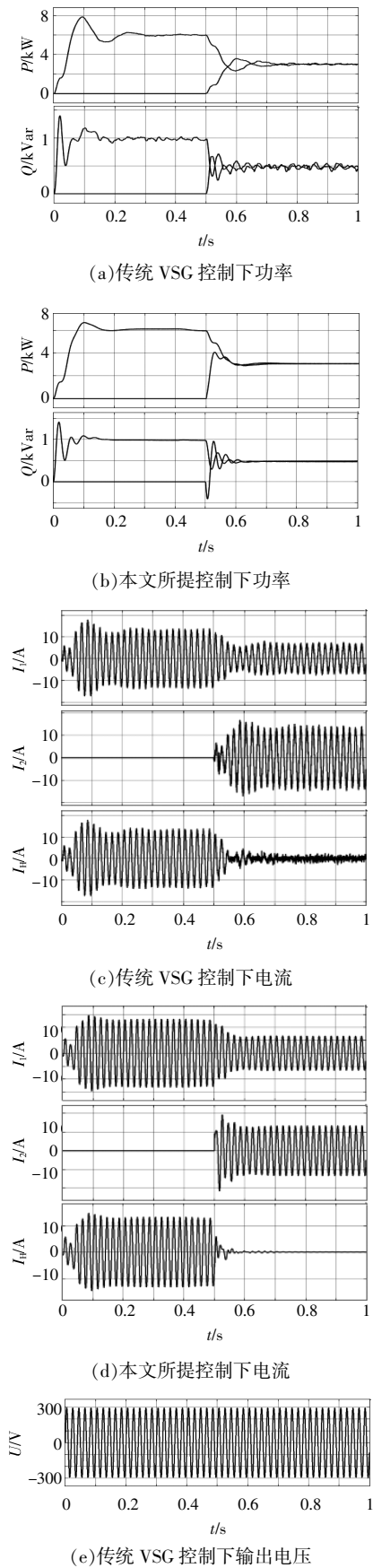
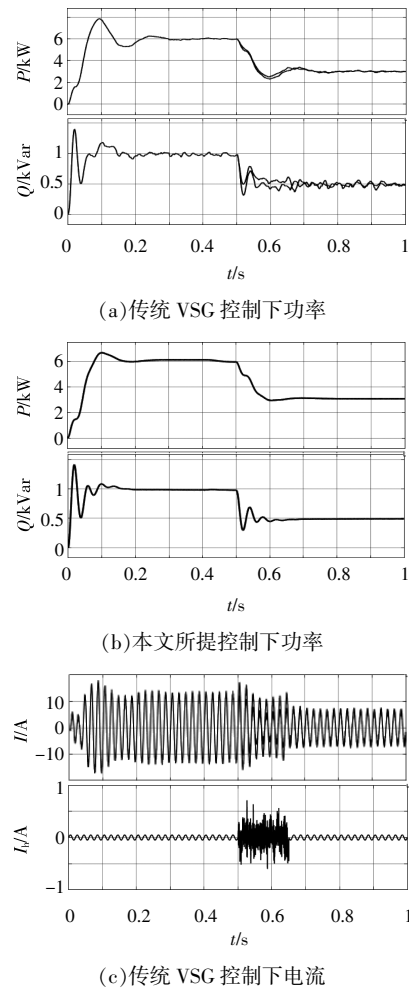
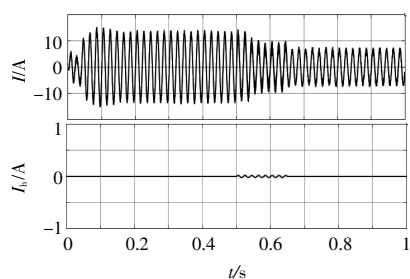


图 9 传统 VSG 控制器与所提控制器下的仿真结果对比
Fig.9 Comparison of simulation results between traditional VSG controller and proposed controller

由图 9(a), (b), (c), (d)可以看出,所提控制和传统的基于虚拟阻抗技术改进 VSG 控制都可以实现输出有功、无功功率的均分控制,并且可以很好地抑制环流。由图 9(e), (f)可以看出,传统的基于虚拟阻抗技术改进的 VSG 控制下的输出电压存在明显电压降落,所提控制下的输出电压跌落较小,输出电能质量较高。

图 10 为负载功率突变时,分别采用传统的基于虚拟阻抗技术改进的 VSG 控制和所提控制下两台并联 VSG 的仿真结果。





(d)本文所提控制下电流

图 10 负载突变下的仿真结果对比图

Fig.10 Comparison diagram of simulation results under sudden load change

两台并联VSG同时运行,在0.5 s时,将负载有功功率、无功功率分别降到3 kW,0.5 kVar。由图10可以看出,所提控制策略可以快速响应负载功率的突变,而传统的VSG控制则需要一定的时间适应负载功率的突变。

4.2 实验分析

为进一步对所提控制策略进行验证,在主控芯片为TMS320F28335DSP的快速控制原型(RCP)单元(YX Space2000)的实验平台进行实验验证。

实验参数与仿真参数相同,实验平台如图11所示。

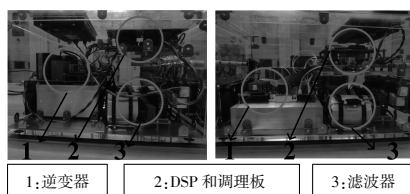
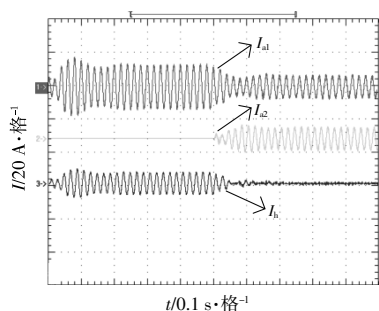


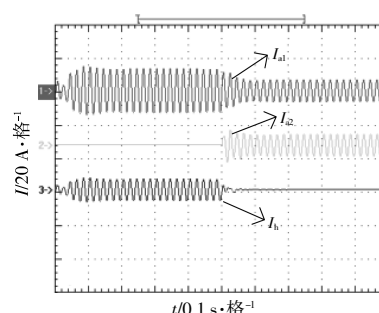
图 11 实验设备图

Fig.11 Experimental equipment diagram

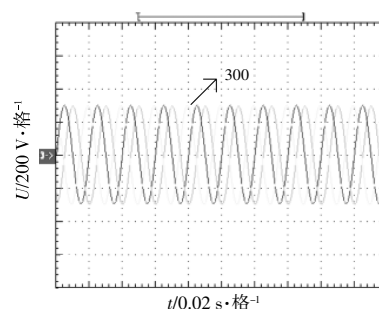
图12分别为采用传统的基于虚拟阻抗技术改进的VSG控制和所提控制,两台并联VSG的实验结果。首先,由第一台VSG独立运行,当其稳定后,接入第二台VSG。



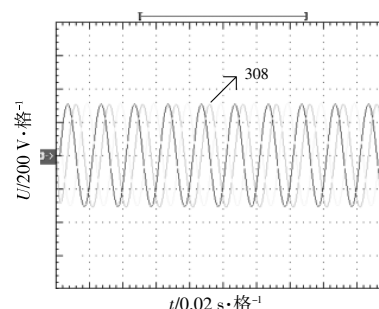
(a)传统VSG控制下电流



(b)本文所提控制下电流



(c)传统VSG控制下输出电压



(d)本文所提控制下输出电压

图 12 实验结果对比

Fig.12 Comparison of experimental results

由图12可以看出,虽然传统VSG控制和本文所提控制均能实现环流抑制。但本文所提控制可以快速响应负载变化,输出电流更为平滑,且输出电压跌落较小。

5 结论

本文针对孤岛微网逆变器并联系统间输电线路阻抗差异对各逆变器输出功率不匹配的原因进行分析,设计带有输电线路功率反馈的改进VSG控制策略,抑制了因输出功率不匹配所引起的环流。通过与传统的基于虚拟阻抗改进VSG控制策略相比,所提控制策略可以达到与传统基于虚拟阻抗改进VSG控制相同的功率均分以及环流抑制效果,并且本文所提控制策略在应对负载功率突变时,具有更快的动态响应能力。

参考文献:

- [1] 贺之渊,杨杰,吴亚楠,等.能源转型下的未来交流和直流联合运行模式及发展趋势探讨[J].中国电机工程学报,2023,43(1):99-113.
- [2] 王婷婷,王玥,于红丽,等.含高比例新能源的新型配电系统韧性资源调度 [J]. 可再生能源,2022,40(9): 1249-1256.
- [3] 汪梦军,郭剑波,马士聪,等.新能源电力系统暂态频率稳定分析与调频控制方法综述[J].中国电机工程学报,2023,43(5):1672-1694.
- [4] 赵恩盛,韩杨,周思宇,等.微电网惯量与阻尼模拟技术综述及展望 [J]. 中国电机工程学报,2022,42(4): 1413-1428.
- [5] 杨炜晨,苗世洪,张世旭,等.交直流混合微电网群分布式自治经济控制策略[J].中国电机工程学报,2021,41(3):857-868.
- [6] 李春,马凡,胡祺.独立电力系统中基于模式切换的虚拟同步发电机控制方法[J].高电压技术,2022,48(9): 3474-3483.
- [7] 汪怡秀,王辉,郝玢鑫,等.基于 VSG 的电网电压不平衡下并网逆变器控制策略[J].可再生能源,2022,40(5): 696-702.
- [8] 邓玮璿,周江林.含不平衡负载的微电网中三相微源逆变器的 VSG 控制策略[J].可再生能源,2021,39(2): 229-236.
- [9] 万晓凤,詹子录,丁小华,等.基于虚拟同步发电机的多逆变器并联改进控制策略 [J]. 电机与控制学报, 2020,24(2):118-127.
- [10] Ping Zhang, Hengyang Zhao, Huanyu Cai, et al. Power decoupling strategy based on 'virtual negative resistor' for inverters in low-voltage microgrids [J]. IET Power Electron,2016,9(5):1037-1044.
- [11] Zhi Chen, Xuejun Pei, Min Yang, et al. An adaptive virtual resistor (AVR) control strategy for low-voltage parallel inverters [J].IEEE Trans. Power Electron, 2019,34(1):863-876.
- [12] Yao Sun, Xiaochao Hou, Jian Yang, et al. New perspectives on droop control in AC microgrid[J].IEEE Trans. Ind. Electron,2017,64(7):5741-5745.
- [13] Tiliang Wen, Xudong Zou, Donghai Zhu, et al. Comprehensive perspective on virtual inductor for improved power decoupling of virtual synchronous generator control [J].IET Renewable Power Generation, 2020,14(4):485-670.
- [14] Nabil Mohammed, Abderezak Lashab, Mihai Ciobotaru, et al. Accurate reactive power sharing strategy for droop-based islanded AC microgrids [J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2023,70(3): 2696-2707.
- [15] Minh-Duc Pham, Hong-Hee Lee. Effective coordinated virtual impedance control for accurate power sharing in islanded microgrid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2021,68(3):2279-2288.
- [16] Yinghui Li, Jianan Chen, Xiaohuan Wang, et al. Dynamic stability study of grid-connected inverter based on virtual synchronizer under weak grid [J]. Energies,2022,15:1-17.
- [17] Wenyuan Cao, Minxiao Han, Xiahui Zhang, et al. An integrated synchronization and control strategy for parallel-operated inverters based on V-I droop characteristics [J].IEEE Transactions on Power Electronics,2022,37(5):5373-5384.
- [18] Guofeng He, Min Chen, Wei Yu, et al. Design and analysis of multiloop controllers with DC suppression loop for paralleled UPS inverter system [J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2014,61(12): 6494-6506.
- [19] Jia Liu, Yushi Miura, Hassan Bevrani, et al. Enhanced virtual synchronous generator control for parallel inverters in microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2017,8(5):2268-2277.

Analysis and suppression strategy of parallel improved VSG power circulation

Zhou Zichun^{1,2}, He Guofeng^{1,2}, Dong Yanfei^{1,2}, Lin Junfang^{1,2}

(1.School of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2.School of Electrical and Control Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China)

Abstract: An improved virtual synchronous generator (VSG) control strategy for multi-inverter parallel system is proposed in this paper to suppress the circulating current caused by the impedance difference of transmission lines between PV microgrid inverters in islanded mode. Firstly, based on the traditional VSG control block diagram, each inverter counteracts the power loss on the transmission line by introducing the line power feedback, so as to improve the active and reactive power sharing accuracy, reduce the output voltage drop, and improve power quality. Then, the synchronous controller is introduced to reduce the instantaneous current and suppress the instantaneous circulating current between the multi-inverter parallel system. Finally, the effectiveness of the proposed control strategy is verified by simulation and experiment.

Keywords: island mode; multi -inverter parallel system; virtual synchronous generator; circulation suppression