

文章编号: 1008-1542(2023)01-0012-08

基于自适应虚拟阻抗的逆变器并联控制策略

李永刚, 王业朋, 姜玉霞

(华北电力大学电力工程系, 河北保定 071003)

摘要: 低压微网中, 各并联逆变器之间的连接线路因长度、损耗等不同导致各逆变器并联线路阻抗存在明显差异, 在常规下垂控制下, 各并联逆变器间有功功率存在无法均分的问题。针对上述问题, 提出了一种基于虚拟阻抗的自适应控制策略。首先, 以逆变器功率传输特性与阻性下垂控制方程为基础, 分析并联逆变器在线路呈阻性时有功功率分配不均的原因; 其次, 在传统定值虚拟阻抗基础上, 通过引入并联逆变器的输出功率差构造虚拟阻抗, 自适应地补偿线路阻抗差异, 在不获取本地线路阻抗参数的情况下实现功率均分; 最后, 在 MATLAB/Simulink 仿真平台上建立逆变器并联系统的仿真模型, 进行验证和分析。结果表明, 所提方法能有效实现逆变器间有功和无功功率的均匀分配, 且适用于本地负载不同的情形。基于自适应虚拟阻抗的控制策略改善了并联逆变器间功率的均分水平, 可为低压微网中并联逆变器功率控制的优化设计提供参考。

关键词: 电力电子技术; 自适应虚拟阻抗; 下垂控制; 逆变器并联; 功率均分; 低压微网

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7535/hbkd.2023yx01002

Parallel inverters control strategy based on adaptive virtual impedance

LI Yonggang, WANG Yepeng, JIANG Yuxia

(Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China)

Abstract: In the low-voltage microgrid, the connection lines between parallel inverters are different due to the different length and loss, and the active power of the parallel inverters cannot be evenly distributed under the conventional droop control. Aiming at this problem, an adaptive control strategy based on virtual impedance was proposed. Firstly, based on the inverter power transmission characteristics and the resistive droop control equation, the reason of the uneven power distribution of parallel inverters when the line was resistive was analyzed. Then, based on the traditional fixed virtual impedance, the virtual impedance was constructed by introducing the output power difference of the parallel inverters, and the line impedance

收稿日期: 2022-04-30; 修回日期: 2022-07-11; 责任编辑: 冯 民

基金项目: 国家自然科学基金(51777075); 国网山东省电力有限公司科技项目(2020A-026)

第一作者简介: 李永刚(1967—), 男, 河北保定人, 教授, 博士, 主要从事电机及其系统分析与监控、新能源与电力系统、电气设备状态监测与故障诊断等方面的教学和研究。

E-mail: lygzxm0@163.com

李永刚, 王业朋, 姜玉霞. 基于自适应虚拟阻抗的逆变器并联控制策略[J]. 河北科技大学学报, 2023, 44(1): 12-19.

LI Yonggang, WANG Yepeng, JIANG Yuxia. Parallel inverters control strategy based on adaptive virtual impedance[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2023, 44(1): 12-19.

difference was compensated adaptively, so that the power sharing can be realized without obtaining the local line impedance parameters. Finally, the simulation model of parallel inverters system was established on the MATLAB/Simulink simulation platform for verification and analysis. The results show that the proposed method can effectively realize the sharing of active and reactive power among inverters, and is also suitable for different local loads. The control strategy based on adaptive virtual impedance improves the level of power sharing among parallel inverters, which provides some reference for the optimal design of power control of parallel inverters in low-voltage microgrid.

Keywords: power electronic technology; adaptive virtual impedance; droop control; parallel inverters; power sharing; low-voltage microgrid

为实现“碳达峰、碳中和”目标,同时满足社会发展对能源的需求,需要构建以新能源为主体的新型电力系统^[1]。逆变器作为直流向交流转换的接口,对新能源的利用至关重要。单台大容量逆变器由于生产成本较高、安装维修较困难等问题,其应用领域受到一定限制。多台逆变器并联不仅可以弥补单台逆变器容量小的问题,而且具有可靠性高、容量组合灵活、易于生产和维护等优势^[2],在低电压微电网中应用广泛。多逆变器并联运行要求各逆变器输出电压相量完全一致。在实际应用过程中,各逆变器因拓扑结构、功率等级、运行工况等差异,其器件参数可能不完全一致,且逆变器的线路参数、驱动电路或采样电路也会存在差异^[3],造成逆变器间功率分配不均,降低了电源效率,甚至导致系统不稳定^[4-5]。因此有必要在系统内部采取恰当的功率均分措施。

目前,并联逆变器常见的控制方式有集中控制^[6-8]、主从控制^[9-11]、分布逻辑控制^[12-13]、下垂控制^[14-15]等。其中,下垂控制因具有控制灵活、成本低、可靠性高和便于扩展等优势应用较为广泛^[16]。下垂控制过程和传统同步机组一次调频、一次调压过程类似,利用电压和频率偏移调整逆变器的输出功率,实现系统的功率平衡。但由于下垂控制采用的是比例控制,在功率均分精度和频率、电压误差之间存在不可调和性^[4,15]。

为提升功率均分精度,常见的研究思路主要集中在改进下垂控制和引入虚拟阻抗 2 个方面^[16]。文献[17]将一致性算法和 PI 控制结合计算电压额定值补偿量,提升了系统的稳态和动态性能。文献[18]将自适应下垂系数与虚拟阻抗结合,可提升功率均分精度。文献[19]将虚拟阻抗引入瞬时平均电流控制环节以实现环流抑制,但虚拟阻抗值配置为固定值,不能较好地适应线路阻抗变化。文献[20]提出了一种增强型鲁棒电压下垂控制,能够改善电压跌落问题且具有较好的动态响应,但其引入的虚拟阻抗是为了增加系统阻性,未能消除线路阻抗差异带来的影响。文献[21]将虚拟阻抗与改进下垂功率外环结合,在实现功率均分的同时提升了系统的动态响应。文献[16]和文献[22]分别利用逆变器自身的无功功率和并联逆变器输出的无功功率相对误差构造自适应虚拟电抗,能有效补偿线路电抗差异,实现无功功率均分。

本文在分析了逆变器输出功率传输特性以及阻性下垂控制有功分配不均问题的基础上,提出一种自适应虚拟阻抗控制策略,同时对虚拟电阻和虚拟电抗值进行自适应调节,进而实现逆变器间有功和无功功率均分。最后,通过仿真分析验证该控制策略的有效性及其对本地负载不同情形的适应性。

1 多逆变器并联模型分析

以 2 台逆变器为例,可建立如图 1 所示的并联逆变器系统模型。其中, U_{dc} 为直流侧电压, L 为滤波电感, C 为滤波电容, Z_1 和 Z_2 分别为逆变装置 1、装置 2 与公共连接点间连接的线路阻抗,可用其电阻和电抗分量表示为 $Z_i = R_i + jX_i$ ($i = 1, 2$), Z_{load} 为公共负载。取公共连接点电压 U_L 作为交流侧参考电压,逆变装置 1 和装置 2 的输出电压分别表示为 $U_{o1} \angle \delta_1$ 和 $U_{o2} \angle \delta_2$,相应的输出电流分别记为 \dot{I}_{o1} 和 \dot{I}_{o2} ;逆变装置 1 和装置 2 的有功功率输出分别为 P_1 和 P_2 ,无功功率输出分别为 Q_1 和 Q_2 。

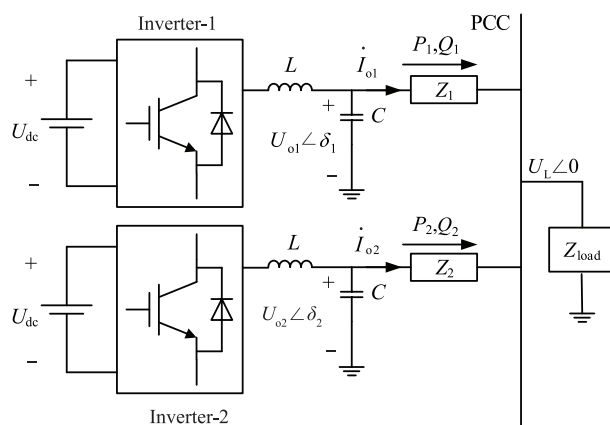


图 1 并联逆变器系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of parallel inverters system

由图 1 中的电路关系可得:

$$\begin{cases} P_i = \frac{(U_{oi}^2 - U_L U_{oi} \cos \delta_i) R_i + U_L U_{oi} X_i \sin \delta_i}{R_i^2 + jX_i^2}, \\ Q_i = \frac{(U_{oi}^2 - U_L U_{oi} \cos \delta_i) X_i - U_L U_{oi} R_i \sin \delta_i}{R_i^2 + jX_i^2}, \end{cases} \quad i = 1, 2. \quad (1)$$

低压微网中,相角 δ_i 通常很小,可近似认为 $\sin \delta_i \approx \delta_i$, $\cos \delta_i \approx 1$ ^[23];线路的阻感比通常较小,可认为 $R_i \gg X_i$,故式(1)可简化为

$$\begin{cases} P_i \approx \frac{U_{oi}(U_{oi} - U_L)}{R_i}, \\ Q_i \approx \frac{-U_{oi}U_L \delta_i}{R_i}, \end{cases} \quad i = 1, 2. \quad (2)$$

由式(2)可知,当线路为阻性时,逆变器输出电压与公共连接点电压之间的幅值差主要影响逆变器的有功功率输出,而无功功率则主要受两者之间的相角差影响。相角的瞬时变化不明显,实际多采用角频率来表示角度瞬时变化。

2 下垂控制分析

由以上分析结果可知,在低电压微电网中,线路等效为阻性的情形下,逆变器的下垂特性可设置为

$$\begin{cases} U_i = U_0 - k_{pi} P_i, \\ \omega_i = \omega_0 + k_{qi} Q_i, \end{cases} \quad i = 1, 2, \quad (3)$$

式中: U_i, ω_i 分别为实际输出电压的幅值和角频率; U_0, ω_0 分别为空载输出电压幅值和角频率的参考值; k_{pi}, k_{qi} 分别为有功功率和无功功率的下垂系数。

当系统处于稳态时,各逆变器工作频率一致,因此并联逆变器在下垂控制下无功功率能实现均分。然而受线路阻抗差异等因素影响,各逆变器的线路压降存在差异,使得在下垂控制下有功功率难以实现均分。

由式(2)得逆变器 i 线路上的压降为

$$\Delta U_i = (U_{oi} - U_L) = \frac{P_i R_i}{U_{oi}}, \quad i = 1, 2. \quad (4)$$

通常认为逆变器输出电压 U_{oi} 变化较小,式(4)中的分母可取为额定值 U_N 。故线路压降与有功功率呈线性关系,相应的曲线斜率可表示为

$$k_{Li} = \frac{R_i}{U_N}, \quad i = 1, 2. \quad (5)$$

图 2 显示了下垂控制下有功功率分配不均的原因。对于相同容量的逆变器,其有功下垂系数也应设置为相同,初始时均为 k_{pa} 。若逆变器 1 的线路电阻较逆变器 2 大,即 $R_1 > R_2$,则由式(5)知 $k_{L1} > k_{L2}$ 。2 台逆变器的线路压降与有功功率的曲线分别同有功下垂特性曲线相交于图中 A, B 2 点。此即逆变器各自的静态工作点。对比可知,逆变器 1 输出的有功功率较小,2 台逆变器输出的有功功率之间存在一定差异(其差值在图 2 中表示为 ΔP_a),可能造成逆变器 2 过载而逆变器 1 轻载的现象。当 2 台逆变器的下垂系数由 k_{pa} 增大到 k_{pb} 时,静态工作点分别转移至图中 D, E 2 点,2 台逆变器输出的有功功率差值可减小至 ΔP_b 。由此可知,单纯增加下垂系数不能完全消除逆变器间的输出功率差异。若要实现有功功率均分,仍需补偿线路阻抗,使线路压降与有功功率曲线的斜率 k_{L1} 和 k_{L2} 变为相同。

本文采用的逆变器控制过程及逆变器间通信机制如图 3 所示。实际运行时逆变器除了经线路为公共负载供电外,还可能带有不同的本地负载,但由于本地负载可等效成线路阻抗的一部分^[24],因此仍可采用下垂控制。首先,将逆变器经采样得到的输出电压、输出电流和滤波电感电流转换到 dq 坐标系。然后,计算逆变

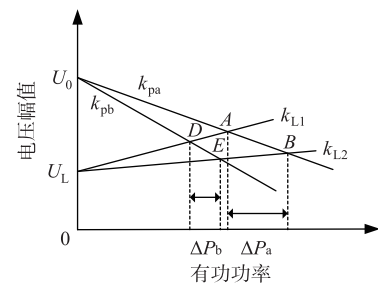


图 2 下垂控制有功功率分配不均示意图

Fig. 2 Schematic diagram of uneven sharing of active power in droop control

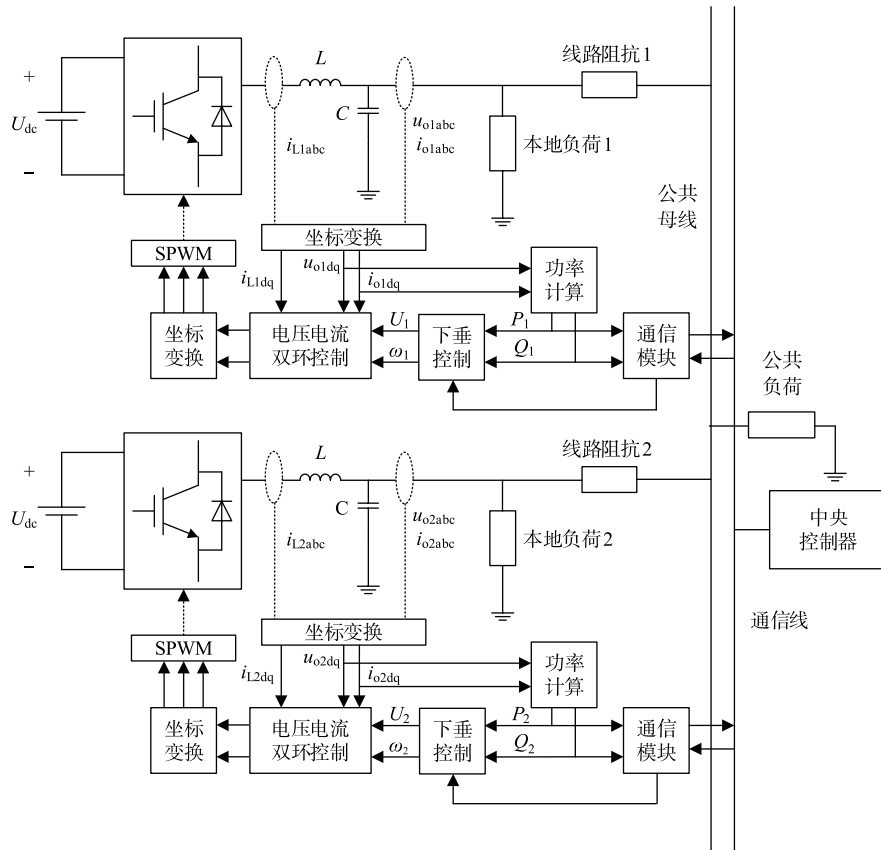


图 3 并联逆变器控制结构框图

Fig. 3 Control block diagram of parallel inversers

器有功功率和无功功率的实际输出值,并将其输入到式(3)对应的下垂控制环节。计算出的电压幅值和角频率参考值用于合成电压外环参考电压。最后,通过电压电流双环控制和坐标变换得到 SPWM 调制电压。

dq 坐标系下,逆变器输出电压及滤波电感电流均存在耦合问题^[15],使得各轴分量难以实现独立控制,故电压电流双环控制环节采用如图 4 所示的前馈解耦方式^[25]以消除耦合影响。其中, u_{dref} 和 u_{qref} 是电压外环的参考电压; u_{od} 和 u_{oq} 是输出电压的实际测量值; i_{Ldref} 和 i_{Lqref} 是电流内环的参考电流; i_{Ld} 和 i_{Lq} 是滤波电感电流的实际测量值; v_d 和 v_q 是电流内环输出,用于合成 SPWM 调制电压。

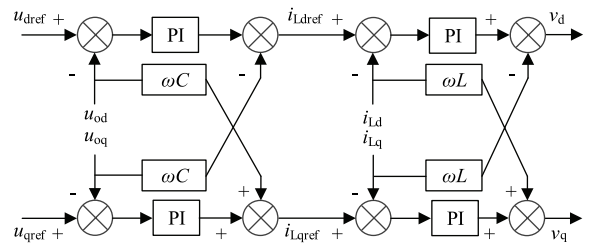


图 4 电压电流双环控制框图

Fig. 4 Control block diagram of inverter with voltage and current dual-loop method

3 自适应虚拟阻抗控制策略

虚拟阻抗是下垂控制常见的改进方法。通过在逆变器输出端增加一个虚拟阻抗,可以补偿并减小电路参数不一致造成的阻抗差异,提升功率均分精度^[26-27]。图 5 为虚拟阻抗控制框图。其中, u_{dqref}^* 为初始电压参考值,由下垂控制输出量经三相电压合成(结果记为 u_{abcref}^*)及坐标变换得到;虚线框内为虚拟阻抗环节, R_v 为虚拟电阻, L_v 为虚拟电感;将实际测量得到的电流信号 i_{odq} 与虚拟阻抗值相乘,在 u_{dqref}^* 基础上减去所得压降,即可得到新的电压参考值 u_{dqref} ,具体如式(6)所示。

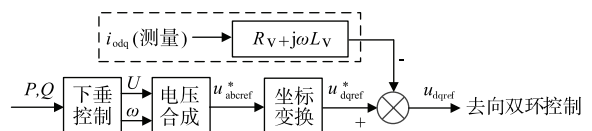


图 5 虚拟阻抗控制框图

Fig. 5 Virtual impedance control block diagram

具体如式(6)所示。

$$\begin{cases} u_{\text{dref}} = u_{\text{dref}}^* - R_{\text{v}} i_{\text{od}} + \omega L_{\text{v}} i_{\text{oq}}, \\ u_{\text{qref}} = u_{\text{dref}}^* - R_{\text{v}} i_{\text{oq}} - \omega L_{\text{v}} i_{\text{od}}. \end{cases} \quad (6)$$

传统定值虚拟阻抗法需获知线路阻抗参数以实现虚拟阻抗值的整定。然而,在实际应用中,等效线路阻抗通常是未知的,并且会发生变化,还会受到本地负载的影响^[28]。为了实现虚拟阻抗值的自动调节以适应等效线路阻抗的不确定性,本文提出了自适应虚拟阻抗控制方案。

仍然以2台逆变器并联为例,中央控制器通过通信线路收集每台逆变器输出的有功功率(P_1, P_2)和无功功率(Q_1, Q_2),并计算有功功率平均值 P_{av} 和无功功率平均值 Q_{av} ,然后将其作为参考值传输给每个逆变器,其中

$$\begin{cases} P_{\text{av}} = \frac{P_1 + P_2}{2}, \\ Q_{\text{av}} = \frac{Q_1 + Q_2}{2}. \end{cases} \quad (7)$$

通常可认为线路电阻主要影响有功功率,线路电感主要影响无功功率(忽略电压相角影响),因此可以利用第 i 台逆变器输出有功功率 P_i 和并联多逆变器输出有功功率的平均值 P_{av} 之差及PI环节(比例系数为 k_{pp} ,积分系数为 k_{pi})构成自适应虚拟电阻;利用第 i 台逆变器输出无功功率 Q_i 和并联多逆变器输出无功功率的平均值 Q_{av} 之差及PI环节(比例系数为 k_{qp} ,积分系数为 k_{qi})构成自适应虚拟电感,具体如式(8)所示。各调节系数可根据系统额定有功、无功功率以及线路阻抗的数量级合理确定,并结合仿真试验调整至最佳。

$$\begin{cases} R_{\text{vi}} = \left(k_{\text{pp}} + \frac{k_{\text{pi}}}{s} \right) (P_i - P_{\text{av}}), \\ L_{\text{vi}} = \left(k_{\text{qp}} + \frac{k_{\text{qi}}}{s} \right) (Q_i - Q_{\text{av}}), \end{cases} \quad i = 1, 2. \quad (8)$$

以有功功率控制为例,当2台逆变器控制参数相同时,如果逆变器1输出的有功功率 P_1 大于逆变器2输出的有功功率 P_2 ,则逆变器1的线路电阻应小于逆变器2的线路电阻。由式(7)可知 $P_1 > P_{\text{av}}, P_2 < P_{\text{av}}$,故由式(8)确定的虚拟电阻值 R_{v1} 为正值, R_{v2} 为负值,使得等效线路电阻趋于相同,因此逆变器输出的有功功率可以均匀分配。调节过程中,比例环节使得虚拟电阻值的调节能够及时跟踪有功功率偏差的变化,积分环节使得稳态时虚拟电阻值能够准确补偿线路阻抗偏差,从而实现有功功率均分。无功功率控制过程原理与此相同。

4 控制策略仿真分析

为了验证本文提出的自适应虚拟阻抗控制策略的有效性,在MATLAB/Simulink平台上建立了逆变器的并联仿真模型,仿真参数如表1所示。2台逆变器容量一致,且均采用理想的直流源提供电能。考虑到线路压降,交流侧输出电压幅值设为326.55V,即比额定值311V高5%。仿真步长设为0.001ms。

4.1 常规下垂控制策略仿真分析

2台逆变器经各自线路并联后仅带公共负载,采用常规的下垂控制,仿真时间设置为2s,仿真结果如图6所示。

由图6可知,在仿真启动后,系统很快就进入了稳定状态,在1s时增加公共负载后系统也能较快实现功率平衡。0~1s内,2台逆变器输出的无功功率达到3kVar,实现了均匀分配;逆变器1输出的有功功率约为17kW,而逆变器2仅约14kW,有功功率未能均匀分配,且线路阻抗值较高的逆变器2输出的有功功率较低,符合理论分析结论。1s时增加公共负载后,2台逆变器的无功功率输出都达到5kVar,依然保持均分;逆变器1的有功功率输出在27kW左右,而

表1 仿真参数设计

Tab.1 Design of simulation parameters

参数	数值
直流侧电压 U_{dc}/V	800
滤波电感 L/mH	3
滤波电感寄生电阻 R/Ω	0.16
滤波电容 $C/\mu\text{F}$	654
开关频率 f_{s}/kHz	6
有功下垂系数 k_{p}	5×10^{-4}
无功下垂系数 k_{q}	5×10^{-5}
逆变器1线路阻抗 Z_1/Ω	$0.1282 + j0.0202$
逆变器2线路阻抗 Z_2/Ω	$0.1538 + j0.0303$
电压环控制参数	$k_{\text{up}} = 3.766, k_{\text{ui}} = 60$
电流环控制参数	$k_{\text{ip}} = 6.037, k_{\text{ii}} = 50$
虚拟电阻控制参数	$k_{\text{pp}} = 1 \times 10^{-4}, k_{\text{pi}} = 1 \times 10^{-3}$
虚拟电感控制参数	$k_{\text{qp}} = 1 \times 10^{-9}, k_{\text{qi}} = 1 \times 10^{-8}$

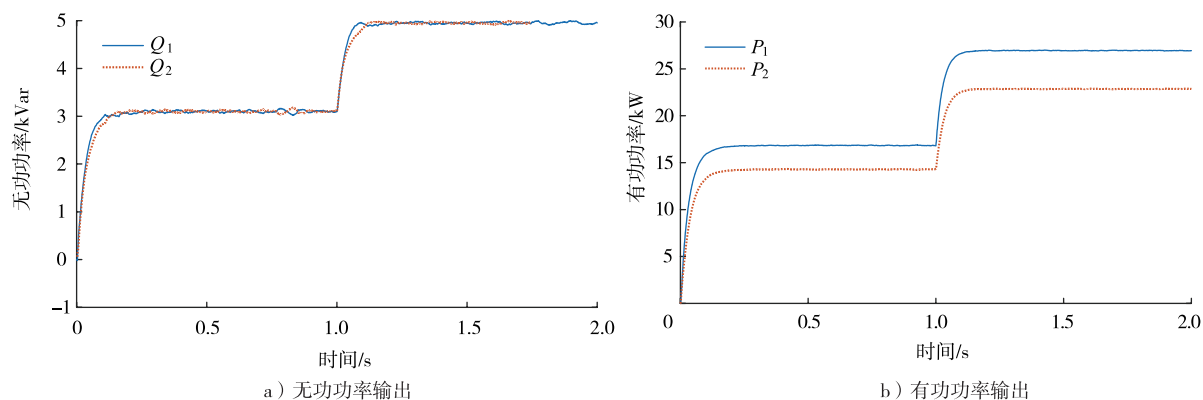


图 6 常规下垂控制仿真结果

Fig. 6 Simulation results of conventional droop control

逆变器 2 在 23 kW 左右,二者间偏差增大,有功功率分配更加不均衡。

4.2 自适应虚拟阻抗控制策略仿真分析

2 台逆变器经各自线路并联后仍然仅带公共负载,采用本文提出的自适应虚拟阻抗控制策略,仿真时间同样设置为 2 s,结果如图 7 所示。

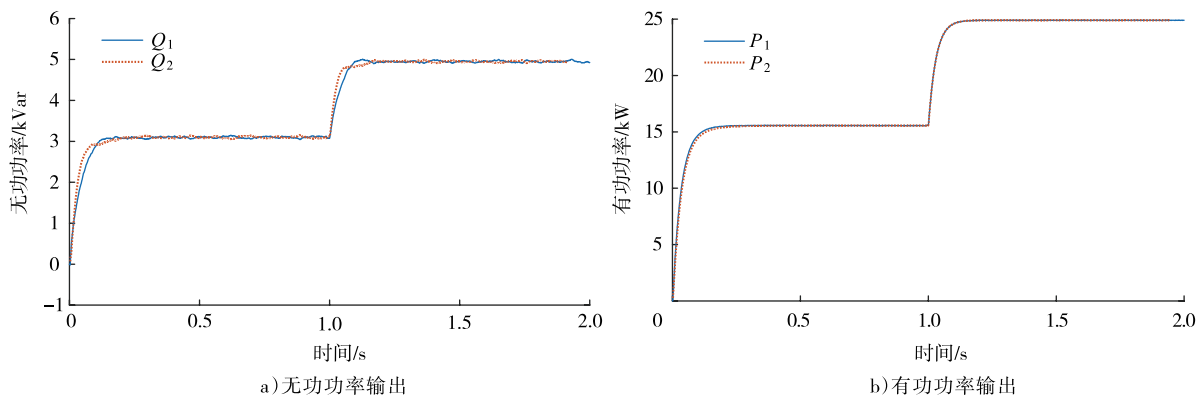


图 7 自适应虚拟阻抗控制仿真结果

Fig. 7 Simulation results of adaptive virtual impedance control

2 台逆变器在 0~1 s 内均输出 3 kVar 的无功功率和 16 kW 的有功功率,有功和无功功率分配均匀。1 s 时增加公共负载后,2 台逆变器无功功率输出均达到 5 kVar,有功功率输出均达到 25 kW,有功和无功功率也都能均匀分配。上述结果表明,本文提出的自适应虚拟阻抗控制策略在线路阻抗不同的情况下可以较好地实现功率均分。

4.3 本地负载不同时仿真对比分析

为验证本地负载不同情况下本文所提控制策略的效果,进行如下仿真验证:2 台逆变器线路阻抗仍与表 1 一致,0~0.5 s 时带公共负载,采用常规下垂控制;0.5~1 s 时公共负载不变,采用固定值虚拟阻抗,根据实际线路阻抗差值确定虚拟电阻值和虚拟电抗值;1 s 时在 2 台逆变器线路始端加入不同的本地负载;1.5~2.5 s 时采用本文提出的自适应虚拟阻抗,对比仿真结果如图 8 所示。

在 0~0.5 s 内,2 台逆变器的无功功率输出基本相同,但输出的有功功率存在偏差,说明常规的下垂控制难以适应线路阻抗不等的情况,需要改进。在 0.5~1 s 内,2 台逆变器输出的有功和无功功率相同,说明在已知线路阻抗时可通过定值虚拟阻抗补偿线路阻抗差异带来的影响,使逆变器间功率分配更加均匀。1~1.5 s 内 2 台逆变器输出的无功功率仍相等,但由于虚拟阻抗取固定值,无法适应加入不同本地负载带来的等效线路阻抗变化,造成 2 台逆变器输出的有功功率不再均分。1.5~2.5 s 内,2 台逆变器输出的无功功率和有功功率在稳态时达到一致,结果表明,本文提出的自适应虚拟阻抗能够适应本地负载不同的情况,有效补偿本地负载不同引起的等效线路阻抗差异,实现功率均分。

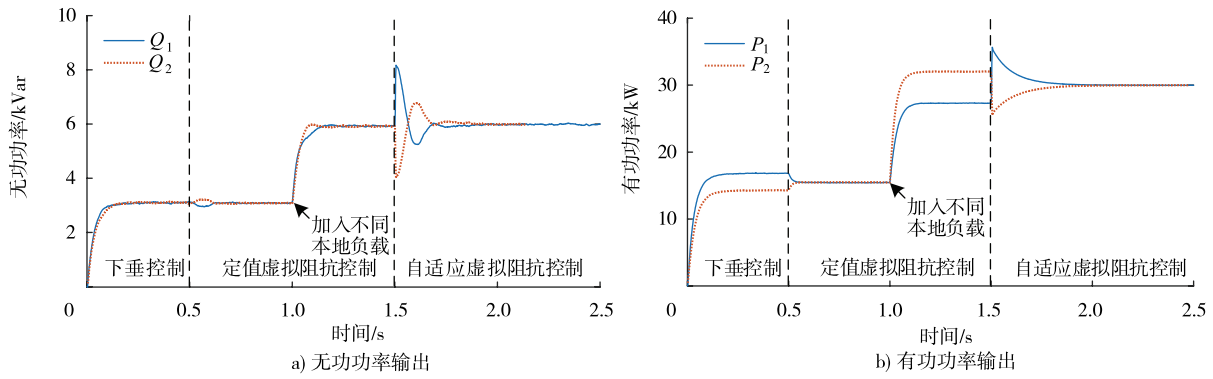


图8 对比仿真结果

Fig. 8 Simulation results for comparison

5 结语

在低压微网中,当逆变器的线路阻抗不同时,采用常规阻性下垂控制的并联逆变器之间的有功功率不能均匀分配。虽然增加有功下垂系数可以减小有功输出偏差,但不能完全消除偏差。本文提出的自适应虚拟阻抗控制策略可以根据逆变器之间的输出功率差实现虚拟阻抗的自适应调节,补偿等效线路阻抗偏差,实现有功和无功功率的均匀分配。同时,仿真结果也表明,所提控制策略在逆变器线路阻抗和本地负载均有差异的条件下也能有效改善功率均分效果,对于优化低压微网中并联逆变器的功率控制具有参考价值。

本文主要针对并联逆变器间的功率均分进行相关研究,没有考虑并联逆变器之间的有功和无功耦合。未来需要完善控制策略,提升系统的动态响应性能和电能质量。

参考文献/References:

- [1] 李晖,刘栋,姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报,2021,41(18):6245-6258.
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6258.
- [2] 陈薇,赵强. 基于虚拟阻抗的逆变器并联控制策略的研究[J]. 电气工程学报,2018,13(8):7-11.
CHEN Wei, ZHAO Qiang. An inverter parallel control strategy research based on virtual impedance[J]. Journal of Electrical Engineering, 2018, 13(8): 7-11.
- [3] 肖怡. 三相并联 PWM 逆变器的环流分析及控制方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
XIAO Yi. Research on Analysis and Control Strategy of Circulating Current of Parallel Three-Phase PWM Inverters[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [4] 李闯. 交流微电网多逆变器并联环流控制策略研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2020.
LI Chuang. Research on Circulating Current Control Strategy for Parallel Connection of Multi-Inverters in AC Microgrid[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2020.
- [5] 杨建民. 微电网多并联型逆变器功率分配与环流抑制研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2019.
YANG Jianmin. Research on Power Sharing and Circulating Current Restraining of Parallel Multi-Inverters in Microgrid[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2019.
- [6] ABDELAZIZ M M A, SHAABAN M F, FARAG H E, et al. A multistage centralized control scheme for islanded microgrids with PEVs [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(3): 927-937.
- [7] RUAN Xinbo, CHEN Wu, CHENG Lulu, et al. Control strategy for input-series-output-parallel converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(4): 1174-1185.
- [8] TAN Jingtao, LIN Hua, ZHANG Jun, et al. A novel load sharing control technique for paralleled inverters[C]//IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist, 2003. Acapulco: IEEE, 2003: 1432-1437.
- [9] 袁立强,高深,姬世奇,等. 基于占空比同步的电力电子变压器低压交流端口模式切换控制[J]. 电工技术学报,2022,37(3):729-738.
YUAN Liqiang, GAO Shen, JI Shiqi, et al. Mode transition for low voltage AC port of power electronic transformers based on duty cycle synchronization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(3): 729-738.
- [10] LI D, HO C N M. A delay-tolerable master-slave current-sharing control scheme for parallel-operated interfacing inverters with low-bandwidth communication[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(2): 1575-1586.
- [11] CALDOGNETTO T, TENTI P. Microgrids operation based on master-slave cooperative control[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4): 1081-1088.

- [12] XIN Huanhai,ZHANG Leiqi,WANG Zhen,et al. Control of island AC microgrids using a fully distributed approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2015,6(2):943-945.
- [13] 肖岚,刘爱忠,方天治,等. 使用平均电流控制的逆变器并联系统[J]. 中国电机工程学报,2008,28(3):77-82.
XIAO Lan,LIU Aizhong,FANG Tianzhi,et al. Multi-inverter parallel system applying average current controlling method[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(3):77-82.
- [14] 冯夏云,汪飞,李玉菲,等. 下垂控制逆变器输出阻抗外特性建模及参数敏感性分析[J]. 中国电机工程学报,2020,40(21):7012-7021.
FENG Xiayun,WANG Fei,LI Yufei,et al. Modelling and sensitivity analysis for the output impedance profile of droop controlled inverter[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(21):7012-7021.
- [15] 龚崇伟. 微网逆变器下垂控制策略研究[D]. 重庆:重庆大学,2018.
GONG Chongwei. Research on Drooping Control of Microgrid Inverter[D]. Chongqing:Chongqing University,2018.
- [16] 王俊凯,牟龙华,刘鑫. 基于动态虚拟阻抗的多并联逆变器间环流抑制控制策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(4):94-100.
WANG Junkai,MU Longhua,LIU Xin. Control strategy based on dynamic virtual impedance to suppress circulating current between multiple parallel inverters[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(4):94-100.
- [17] 王岳,杨国华,董晓宁,等. 基于多智能体一致性的微电网无功功率分配方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(17):54-60.
WANG Yue,YANG Guohua,DONG Xiaoning,et al. Study on reactive power distribution method of microgrid based on multi-agent consistency[J]. Power System Protection and Control,2019,47(17):54-60.
- [18] 马文涛,王金梅,苗海东,等. 不同功率等级逆变器并联的改进下垂控制策略研究[J]. 太阳能学报,2021,42(8):16-22.
MA Wentao,WANG Jinmei,MIAO Haidong,et al. Research on improved droop control strategy for paralleled inverters with different power levels[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica,2021,42(8):16-22.
- [19] 杨黎晖,杨岚. 双环控制逆变器采用虚拟阻抗的并联控制策略[J]. 电力电子技术,2020,54(9):4-7.
YANG Lihui,YANG Lan. Control strategy using virtual impedance for parallel-connected inverters with double-feedback-loop control[J]. Power Electronics,2020,54(9):4-7.
- [20] 张继红,宋广宇,熊伟,等. 基于虚拟复阻抗的增强型鲁棒电压下垂控制方法及环流抑制策略[J]. 太阳能学报,2021,42(12):401-409.
ZHANG Jihong,SONG Guangyu,XIONG Wei,et al. Enhanced robust voltage droop control method and circulating current suppression strategy based on virtual complex impedance[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica,2021,42(12):401-409.
- [21] 张继红,赵锐,刘云飞,等. 低压微网阻性逆变器并联运行控制策略[J]. 高电压技术,2022,48(1):136-146.
ZHANG Jihong,ZHAO Rui,LIU Yunfei,et al. Resistive inverters output impedance parallel operation strategy in low-voltage microgrid[J]. High Voltage Engineering,2022,48(1):136-146.
- [22] 刘滔,官弼刚,梁亦峰. 基于虚拟阻抗的孤岛微网并联逆变器间环流抑制策略[J]. 智能计算机与应用,2020,10(1):160-164.
LIU Tao,GUAN Bigang,LIANG Yifeng. Circulation suppression strategy of islanded microgrid parallel inverter based on virtual impedance[J]. Intelligent Computer and Applications,2020,10(1):160-164.
- [23] 梁海峰,郑灿,高亚静,等. 微网改进下垂控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(17):4901-4910.
LIANG Haifeng,ZHENG Can,GAO Yajing,et al. Research on improved droop control strategy for microgrid[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(17):4901-4910.
- [24] 杨帅帅,卢子广,宫萍萍. 基于等效阻抗的逆变器并联与环流抑制研究[J]. 电力电子技术,2021,55(7):64-67.
YANG Shuaishuai,LU Ziguang,GONG Pingping. Research on parallel connection and circulating current suppression of inverters based on equivalent impedance[J]. Power Electronics,2021,55(7):64-67.
- [25] 高首聪,顾后生. 基于下垂控制的微电网多逆变器并联运行研究[J]. 控制与信息技术,2020(2):41-48.
GAO Shoucong,GU Housheng. Research on the parallel operation of micro-grid multiple inverters based on droop control[J]. Control and Information Technology,2020(2):41-48.
- [26] 曹以龙,王昌尧,江友华,等. 基于阻抗功率下垂的并联逆变器功率均分策略[J]. 电力电子技术,2021,55(5):101-104.
CAO Yilong,WANG Changyao,JIANG Youhua,et al. A power sharing method for parallel inverters based on impedance-power droop[J]. Power Electronics,2021,55(5):101-104.
- [27] 薛婵. 微电网改进下垂控制及谐波抑制方法研究[D]. 沈阳:沈阳化工大学,2019.
XUE Chan. Study on Improved Droop Control and Harmonic Suppression Method of Microgrid[D]. Shenyang:Shenyang University of Chemical Technology,2019.
- [28] 贾要勤,胡长华,何巧惠. 基于自适应虚拟阻抗的微电网功率控制策略[J]. 控制与信息技术,2018(1):12-20.
JIA Yaoqin,HU Changhua,HE Qiaohui. Power control strategy of microgrid based on adaptive virtual impedance[J]. Control and Information Technology,2018(1):12-20.