

基于改进动态下垂控制微网控制方法研究

常潇¹,侯哲晖²,刘翼肇¹,李慧蓬¹,高乐¹,任学武³

(1. 国网山西省电力公司 电力科学研究院,山西 太原 030001;2. 国网山西省电力公司,山西 太原 030021; 3. 北京谦润和科技有限公司,北京 100193)

摘要: 为了提高分布式电源并联运行时的系统功率均分准确度以及负荷变化时的系统稳定性,提出了一种基于改进动态下垂控制的微电网控制方法。首先,针对传统下垂控制特性进行分析,引入动态下垂系数、灵敏度系数,建立改进动态下垂系数控制模型,并通过搭建仿真模型和实验对其有效性进行验证。其结果得到:基于改进动态下垂控制的微电网控制方法可以将电压频率准确度大大提升,且在负载投切过程中电压频率以及幅值的波动显著降低,逆变器的功率均分准确度也明显提高。仿真和实验结果表明,该方法利用灵敏度系数有效保障良好动态特性与功率均分效果,对进一步推动微电网控制技术的发展和提高电能质量具有重要的参考意义。

关键词: 分布式电源;动态下垂控制;微电网;灵敏度系数;下垂系数

中图分类号: TM73 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd21992

Research on Control Method of Micro-grid Based on Improved Dynamic Droop Control

CHANG Xiao¹, HOU Zhehui², LIU Yizhao¹, LI Huipeng¹, GAO Le¹, REN Xuewu³

(1. *Electric Power Research Institute, State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030001, Shanxi, China*; 2. *State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030021, Shanxi, China*; 3. *Beijing Qianrun Technology Co., Ltd., Beijing 100193, China*)

Abstract: In order to improve the accuracy of power sharing and the stability of the system when the load changes, a control method of micro-grid based on improved dynamic droop coefficient control was proposed. Traditional droop control characteristics were analyzed. The control model of improved dynamic droop coefficient was established by introducing the sensitivity coefficient and dynamic droop coefficient. Its effectiveness was verified by building simulation model and experimenting. It can be obtained that the accuracy of voltage frequency can be greatly improved based on the improved dynamic droop control. In the process of load switching, the fluctuation of voltage frequency and amplitude is significantly reduced and the power sharing accuracy of inverter is also improved obviously. The simulation and experimental results show that the method can effectively guarantee good dynamic characteristics and power sharing effect by using sensitivity coefficient. It has important reference significance for further promoting the development of micro-grid control technology and improving power quality.

Key words: distributed power; dynamic droop control; micro-grid; sensitivity coefficient; droop coefficient

近年来,随着化石能源的持续高消耗,能源的可持续性成为了一个重要问题^[1]。随着科技的进步,新能源以及可再生能源受到越来越多的关注。微电网是此分布式电源的主要载体,其运行时对环境的影响较小,还能有效缓解能源紧张问题^[2-3]。利用逆变器作为微电网和大电网之间连接的桥梁,进而实现能量的传递^[4-5]。因此,对逆

变器的控制方法进行研究对系统稳定运行有重要意义。

为了能够有效抑制在运行模型变化过程对电网产生较大影响,需控制侧保持一致性,目前使用最普遍的为传统下垂控制方法^[6-7]。然而传统下垂控制方法仍存在输出功率无法均分,甚至会造成较大的环流现象。由于其参数为固定设

基金项目: 山西省科技重大项目专项(11102028);国网山西省电力公司科技项目(520530180011)

作者简介: 常潇(1987—),男,博士,高级工程师,Email: memocy@sina.com

置,无法针对负荷变化时展开相应变化,将会造成输出不稳定^[8-9]。因此,一些针对下垂控制方法的改进方法被研究。文献[10]将逆变器的基波以及谐波结合下垂控制能够降低电压谐波的影响,并根据容量较为合理地分配功率,增大功率均分精确度。文献[11]将负荷的电压幅值结合下垂控制,进而能够有效控制电压幅值,然而其造成无功功率的下垂系数大,影响系统的稳定运行。文献[12]在传统控制技术中引进虚拟电抗,进而让其输出阻抗为感性,并修正无功功率与电压幅值关系,最终实现无功功率均分的准确度,然而虚拟阻抗造成系统电压减小,影响输出电能质量。此外,还有一些基于鲁棒性或基于电网功率裕度等对下垂控制方法进行的改进^[13-16],然而目前的改进方法仍存在系统的功率分配准确度不足、系统负荷发生突变时稳定性不足以及在逆变器并联运行时会引发环流等问题^[17-18],因此亟待研究一种合理可靠的微电网控制方法。

为了有效抑制负荷波动对系统输出的影响,以及提高分布式电源并联运行时功率分配准确度,本文针对基于改进动态下垂控制的微电网控制方法展开了一系列研究。首先分析了传统下垂控制特性,通过引入动态下垂系数、灵敏度系数建立改进动态下垂系数控制模型,并通过仿真与实验对该改进方法与传统下垂控制方法结果进行对比,从而对该方法的可行性进行验证,其结果具有一定的工程实际意义。

1 下垂控制基本策略分析

下垂控制是微源的控制方法,主要能够完成逆变器有功功率以及无功功率的解耦控制^[19]。因为在微电网里的输电线路距离比较短,且逆变器的输出阻抗主要是感性的,分别对其电压幅值以及频率进行调整,进而完成对无功功率以及有功功率的输出。

下垂控制通常针对多个逆变器并联运行时进行控制,系统中有两个逆变器并联运行时逆变器能够视为电压源,其等效电路如图1所示。

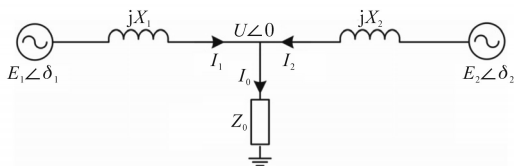


图1 逆变器并联运行等效图

Fig.1 Parallel operation equivalent diagram of two inverters

传统的下垂控制效率受线路阻抗影响大,令阻抗与电感的比值不大时,微电网的有功功率输出和频率存在正比例关系,无功功率输出和电压幅值也存在正比例关系,其传统下垂控制表达式定义为

$$\begin{cases} f = f_0 - \lambda P \\ U = U_0 - \delta Q \end{cases} \quad (1)$$

式中: f, f_0 分别为逆变器电压频率的实际值和基准值; U, U_0 分别为逆变器电压幅值的实际值和基准值; λ, δ 分别为有功功率和无功功率的下垂系数; P, Q 分别为系统的有功功率和无功功率。该系统有功功率的下垂特性如图2所示,其中,两条曲线分别表示了两台逆变器特性。

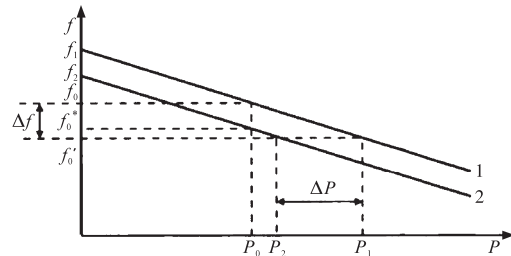


图2 有功功率的下垂特性

Fig.2 Droop characteristic diagram of active power

通过图2中能够获得频率的变化关系为

$$\begin{cases} f_0 - f'_0 = \lambda P_1 \\ f_0^* - f'_0 = \lambda P_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_0^* 为逆变器的输出电压频率参考值; f'_0 为因负荷改变导致下降后的频率; P_1, P_2 分别为两台逆变器在频率为 f'_0 时的有功功率值。

进而能够得出有功功率下垂系数表达式为

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{(f_0 - f'_0) - (f_0^* - f'_0)}{P_1 - P_2} \\ &= \frac{\Delta f - (f_0^* - f'_0)}{\Delta P} \end{aligned} \quad (3)$$

从式(3)中能够得到,当下垂系数 λ 增大时,其有功功率在一样负荷下的差值 ΔP 将会下降,频率差值 Δf 则会上升。因此,该 λ 值与 ΔP 以及 Δf 分别呈现正相关以及负相关的关系。而且无功功率的下垂系数与无功功率、电压幅值之间也存在该规律。

2 改进动态下垂系数的控制方法

2.1 动态下垂控制基本原理分析

在微电网系统里并联多个分布式电源发电,且都利用有功功率与频率的下垂控制策略时,因为不同的分布式电源的输出阻抗以及负荷情

况都不一致,可能会导致不同的分布式电源的输出有功功率也有所不同,该差值容易造成环流现象。通过加入虚拟的阻抗,进而对其下垂系统进行调整,从而可以有效减小不同分布式电源间存在的有功功率偏差,然而该虚拟阻抗将会让系统对电压控制的有效性降低。因此,为有效降低有功功率偏差,同时保证系统控制的准确性,提出了一种改进动态下垂系数的控制策略。该策略把传统下垂控制方法里的固定下垂系数变换成具有功率变化和功率灵敏度系数的动态下垂系数,进而增大控制的准确性和有效性。其具体表达式为

$$\begin{cases} f = f_0 - (m_1 + m_2 P)P - \varepsilon_1 \sqrt{\left| \frac{P}{P_0} - 1 \right|} \\ U = f_0 - (n_1 + n_2 Q)Q - \varepsilon_2 \sqrt{\left| \frac{Q}{Q_0} - 1 \right|} \end{cases} \quad (4)$$

式中: m_1, m_2 为有功功率调节时的动态下垂系数; n_1, n_2 为无功功率调节时的动态下垂系数; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 为下垂控制系统中的灵敏度系数。

将式(1)和式(4)进行对比能够得到:利用有功功率的动态下垂系数 m_1+m_2P 替代原来的系数 λ 可以让下垂系数跟着功率的改变展开调整,进而有效保持 $(m_1+m_2P)P$ 结果稳定,其下垂控制的系统结构如图3所示。灵敏度系数可以让系统在更短的时间内做出反应,进而对下垂系数进行调整,保障下垂控制系统的可靠性以及动态特性。

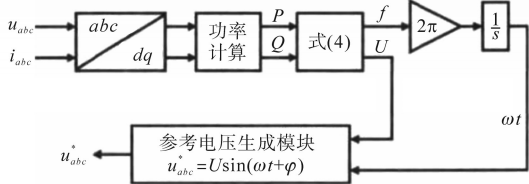


图3 下垂控制的系统结构

Fig.3 System structure of droop control

2.2 动态下垂控制参数设计

改进的动态下垂控制的频率会随着有功功率的变化进行调整,动态下垂控制的频率与功率的关系如图4所示。在传统的下垂控制里有功负荷和系统频率呈现出反比例函数关系,并且其下垂系数即为恒定的斜率,因此传统的下垂控制是图4a中的 m_2 值为0的直线。若有功功率达到目标值时,系统的频率将会逐渐趋于稳定,进而能够让电压在某区间内保持稳定,加强系统出现负载突变后的可靠性和稳定性。此

外,通过设计下垂系数的灵敏度系数能够降低功率突变产生的超调量,进而能够保障系统的动态特征。

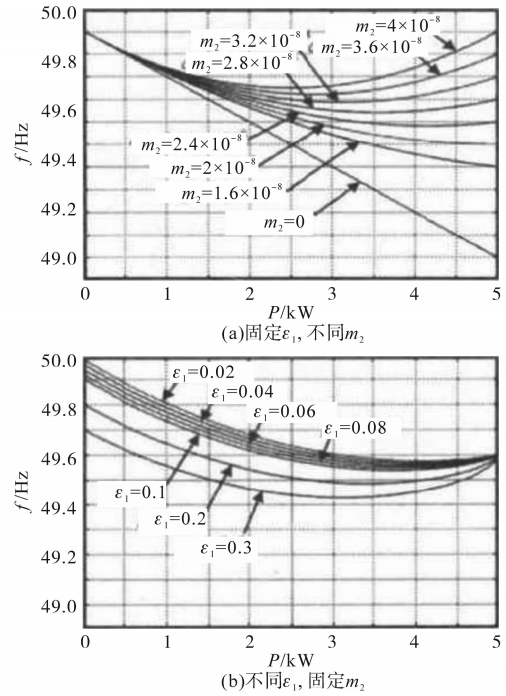


图4 动态下垂控制的频率与功率关系图

Fig.4 The relationship between frequency and power of dynamic droop control

分布式电源并网运行的功率传递等效电路如图5所示。

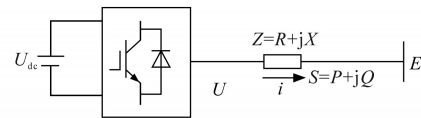


图5 分布式电源并网等效电路

Fig.5 Grid connected equivalent circuit of distributed generation

图5中, Z 为输出阻抗; U, i 分别为逆变器输出电压和电流; E 为耦合点的电压; S 为视在功率。通过该模型能够得出系统的 P 和 Q 的表达式为

$$\begin{cases} P = \frac{RU(U - E\cos\alpha) + XUE\sin\alpha}{R^2 + X^2} \\ Q = \frac{XU(U - E\cos\alpha) - RUE\sin\alpha}{R^2 + X^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: R, X 分别为系统线路电阻和电抗值; α 为相角。

若逆变器的阻抗为感性,则式(5)能够变换为

$$\begin{cases} P = \frac{UE\sin\alpha}{X} \\ Q = \frac{U(U - E\cos\alpha)}{X} \end{cases} \quad (6)$$

为了有效降低谐波的不良反应,把有功功率

以及无功功率通过低通滤波,进而得到小信号模型方程为

$$\begin{cases} \Delta P = \mu E \frac{\cos\alpha\Delta\alpha + \sin\alpha\Delta U}{X(s + \mu)} \\ \Delta Q = \mu \frac{EU\sin\alpha\Delta\alpha + (2U - E\cos\alpha)\Delta U}{X(s + \mu)} \end{cases} \quad (7)$$

式中: μ 为低通滤波的截断频率; $\Delta\alpha, \Delta U$ 分别为相角和电压幅值的波动。

令有功功率调节时的动态下垂系数 m_1 和 m_2 分别为

$$\begin{cases} m_1 = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{P_{\max}} \\ m_2 = \frac{0.6m_1}{P_{\max}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: f_{\max}, f_{\min} 为频率的最大值和最小值; P_{\max} 为最大的有功功率。

将式(4)和式(7)相结合得到根轨迹模型:

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\alpha \\ \Delta U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \sqrt{\frac{P}{P_0} - 1} \\ \varepsilon_2 \sqrt{\frac{Q}{Q_0} - 1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} K_{11} = \frac{s^2 + \mu s + \frac{E}{X}U\cos\alpha\mu(m_1 + m_2P)}{s(s + \mu)} \\ K_{12} = \frac{E\sin\alpha\mu(m_1 + m_2P)}{Xs(s + \mu)} \\ K_{21} = \frac{EU\sin\alpha\mu(n_1 + n_2Q)}{Xs(s + \mu)} \\ K_{22} = \frac{s^2 + \mu s + \frac{(2U - E\cos\alpha)}{X}\mu(n_1 + n_2Q)}{s(s + \mu)} \end{cases} \quad (10)$$

再结合图4将传统的下垂控制中下垂系数 m_1 和 m_2 分别设置为0.002和0,灵敏度系数 ε_1 设置为0.03;改进动态下垂控制中下垂系数 m_1 和 m_2 分别设置为0.002和 2.4×10^{-8} 。进而得到传统的下垂控制和改进下垂控制的极点曲线,如图6所示。

从图6a和图6b中能够得到,改进的动态下垂控制策略计算的极点与负实轴的距离较传统策略的短,改进后距离仅为传统的1/3,该值越小则系统的稳定性能越佳。从图6b和图6c中能够得到,通过加入灵敏度系数后,极点到不稳定区域的距离变大了,增大了20%左右,该距离越

大,表明系统的动态调节特性越好。因此,加入灵敏度系数的改进动态下垂控制的动态调节特性较好。

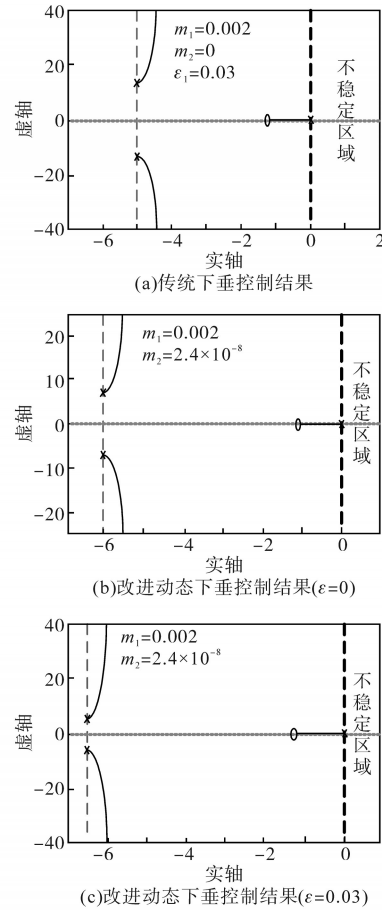


图6 下垂控制的极点关系图
Fig.6 Pole diagram of droop control

3 改进动态下垂控制仿真模型

为了对该改进动态下垂系数控制策略的稳定性和可靠性进行验证,搭建Simulink仿真模型,其微电网等效结构如图7所示。其中主要由3台分布式电源参与,并且将大电网等效为理想的三相电压源,PCC则表示并网开关。

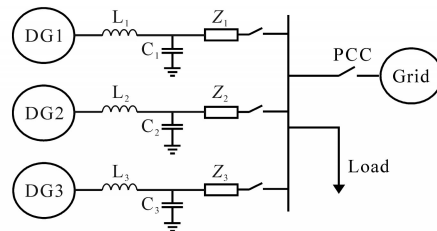


图7 微电网等效结构
Fig.7 Equivalent structure of micro-grid

改进动态下垂系数控制的仿真模型如图8所示,该模型由3台分布式电源参与,为了有效控制

3个分布式电源之间不会产生环流,则须将其空载的频率和电压设置成一样。主要参数设定为:额定电压 220 V,额定电压频率 50 Hz,低通滤波电感和电容分别为 3 mH 和 15 μ F,初始的有功功率和无功功率分别为 4 kW 和 300 var。在仿真过程中,系统运行 0.15 s 后突加有功功率为 1 kW、无功功率为 100 var 的负载;在 0.35 s 后再施加有功功率为 1 kW、无功功率为 100 var 的负载;在 0.55 s 时脱离 1 kW 负载。

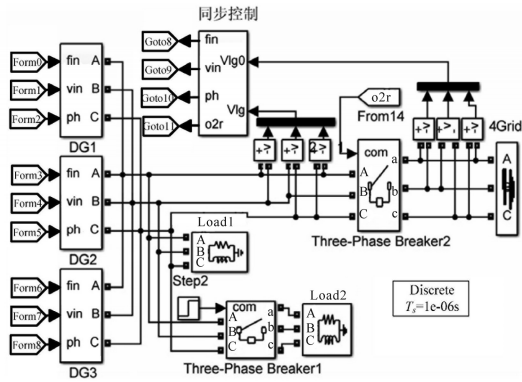
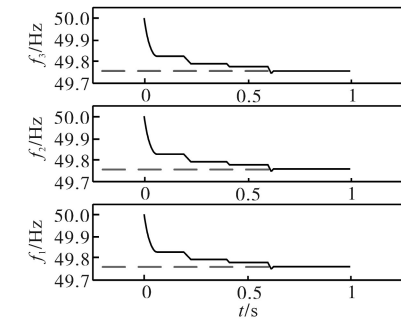


图8 改进动态下垂系数控制仿真模型

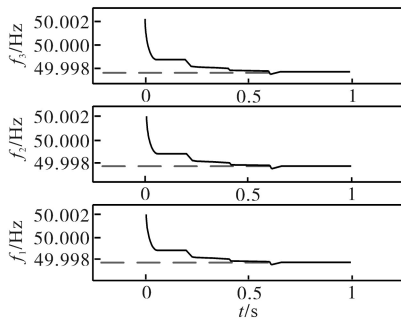
Fig.8 Improved dynamic droop coefficient control simulation model

4 仿真结果与分析

在传统下垂控制和改进动态下垂系数控制下 3 台分布式电源输出的电压频率结果如图 9 所示,输出有功功率结果如图 10 所示。从图 9 中能



(a)传统下垂控制结果

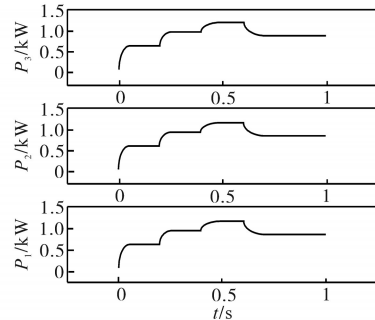


(b)改进动态下垂控制结果

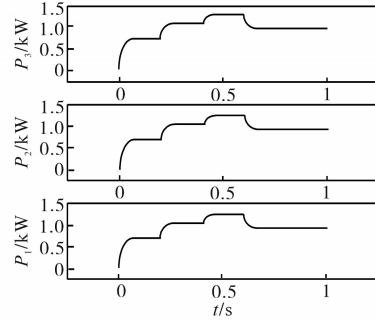
图9 输出电压频率对比结果

Fig.9 Output voltage frequency comparison results

够得到,在传统下垂控制下,系统几次投切负载时,3台分布式电源的频率均从 50 Hz 降低至 49.75 Hz,表明电压频率受系统投切负载时影响较大;而改进动态下垂系数控制下,在突加和脱离负载时频率波动都较小,仅仅降低 0.003 Hz,基本仍保持在 50 Hz,表明该方法下系统电压频率稳定性和准确性高。结合图 10 能够得到,两种方法对输出有功功率的精度接近,且均较为准确。因此,所提的改进控制方法具有较高精度,能够有效投切负荷,并减小波动,大幅度提高了系统的稳定性。



(a)传统下垂控制结果



(b)改进动态下垂控制结果

图10 输出有功功率对比结果

Fig.10 Output active power comparison results

在传统下垂控制和改进动态下垂系数控制下,输出电压幅值结果和输出无功功率分别如图 11 和图 12 所示。从图 11 中能够得到,传统下垂控制在负载投切时,其电压幅值从 312.2 mV 跌落至 311.4 mV,而改进的下垂控制系统中电压幅值则从 311.4 mV 跌落至 311.15 mV,更为接近输入电压,因此表明在改进动态下垂系数控制下电压随着系统负荷投切的变化明显降低。从图 12 中能够得到,在传统下垂控制下其输出无功功率最终稳定在 260 var,而在改进动态下垂系数控制下,其输出无功功率最终稳定在 400 var,进一步表明了基于改进动态下垂系数控制方法更加准确和有效,大大提高了系统的稳定性和电能质量。

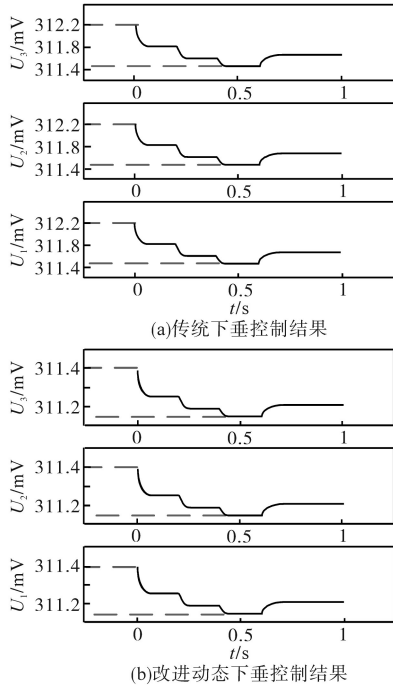


图11 输出电压幅值对比结果

Fig.11 Output voltage amplitude comparison results

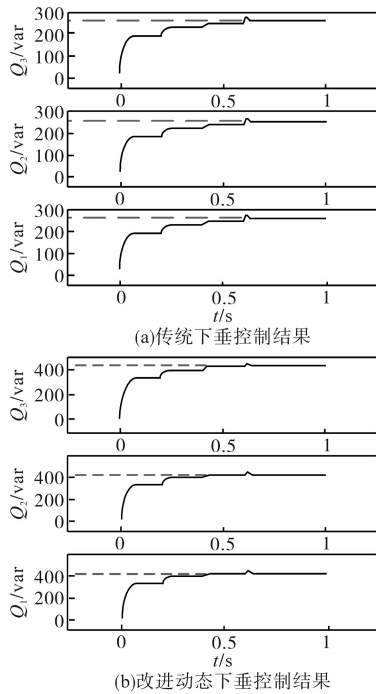


图12 输出无功功率对比结果

Fig.12 Output reactive power comparison results

5 实验结果验证

为了进一步验证所提改进动态下垂系数控制方法的可靠性,搭建实验平台,利用3台3 kW的逆变器样机展开实验,负载谐振角频率设定为20 rad/s,设置线路阻抗为(0.2+j0.58) Ω ,等效结构

见图7,实验平台如图13所示,通过负载箱可实现负载的变化与调节,综合单元能够实现模拟线路阻抗。

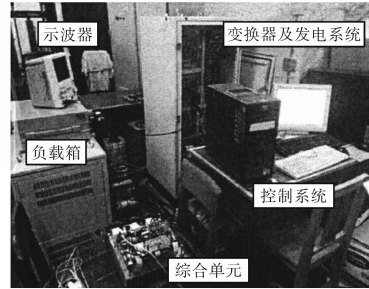


图13 实验系统平台

Fig.13 Experimental system platform

实验系统输出的有功功率以及电压频率结果如图14所示。从图中看出,在施加负荷的情况下,传统下垂控制方法频率降幅达到了0.24 Hz,而所提的改进动态下垂系数控制方法其频率降幅仅为0.05 Hz,两种方法的有功功率一致,进而表明所提改进动态下垂系数控制方法得到的结果更为稳定,频率下降幅度更小。

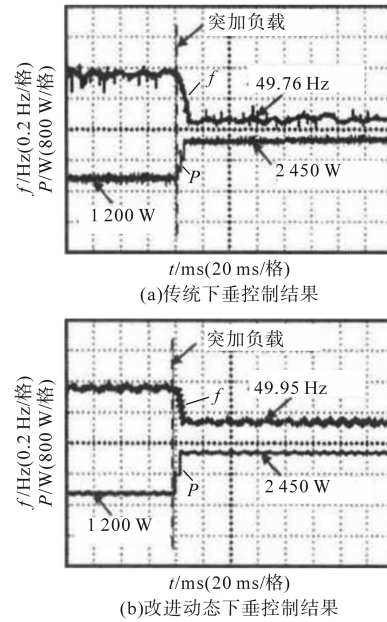


图14 有功功率和电压频率实验结果

Fig.14 Active power and voltage frequency test results

系统输出的无功功率以及电压幅值结果如图15所示。从图中能够看出,在施加负荷的情况下,传统下垂控制方法的电压幅值降幅 ΔU_1 达到了100 V;而所提的改进动态下垂系数控制方法其电压幅值降幅 ΔU_2 仅为30 V,有效抑制了电压的下降,同时有效减小了系统的环流,动态响应速度更迅速,进而进一步验证了所提改进动态下垂系数控制方法的有效性和可靠性。

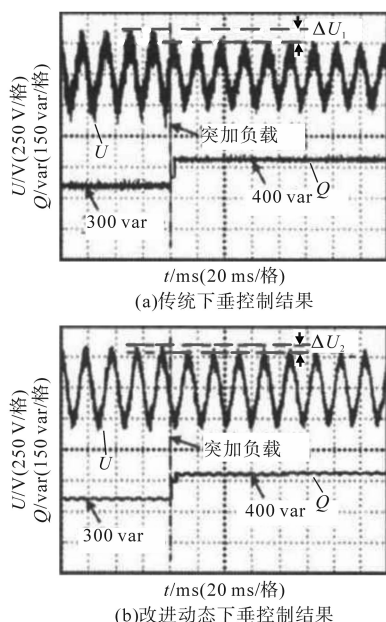


图15 无功功率和电压幅值实验结果

Fig.15 Reactive power and voltage amplitude test results

6 结论

本文研究了基于改进动态下垂系数控制策略,以克服多个分布式电源并联运行时造成的控制准确性不足等问题。对所提控制方法进行仿真与实验得到:基于改进动态下垂系数控制方法能够有效抑制在电网投切负荷时出现的电压下降以及系统输出功率的变化,该方法利用灵敏度系数有效提高动态特性,保障功率均分作用以及稳定性。在仿真模拟中负载突变时,基于改进动态下垂系数的微电网控制下电压频率仍保持在50 Hz水平,而传统下垂控制其频率下降达到0.3 Hz,对有功功率与无功功率的输出控制也更为准确。实验模拟突加负载情况时,基于改进动态下垂系数控制策略对系统的电压、频率等控制更为准确和稳定。因此,仿真和实验结果验证了基于改进动态下垂系数控制策略不仅能够保障良好的动态特性与功率均分效果,还能够显著提高电能质量。其结果对微电网控制方法具有重要的参考意义,进一步推动了微电网控制技术的发展。

参考文献

[1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报,2018,11(7):1893-1904.
Zhou Xiaoxin, Chen Shuyong, Lu Zongxiang, *et al.* Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 11(7): 1893-1904.

[2] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工

程学报,2014,11(1):57-70.

Yang Xinfu, Shu Jian, Lü Zhipeng, *et al.* Overview of microgrid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 11(1): 57-70.

[3] Chao G, Qi G, Li Y. Summary on key control technology of microgrid[J]. Techniques of Automation and Applications, 2015, 27(10): 1142-1146.

[4] 谢卫才,王世豪,何力,等. 一种基于虚拟同步发电机的多逆变器微电网频率无差调节策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019,47(18):66-71.

Xie Weicai, Wang Shihao, He Li, *et al.* A frequent deviation-free regulation strategy of microgrid based on the VSG of multi-inverter[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18):66-71.

[5] Lo K, Chen Y. Design of a seamless grid-connected inverter for microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1):194-202..

[6] He J, Pan Y, Liang B, *et al.* A simple decentralized islanding microgrid power sharing method without using droop control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6):6128-6139.

[7] 汪玉凤,李琳,王立辉,等. 微电网双重下垂控制策略的研究[J]. 高压电器,2018,54(6):212-215,222.

Wang Yufeng, Li Lin, Wang Lihui, *et al.* Study on the double-droop control strategy of microgrid[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(6):212-215,222.

[8] 徐玉琴,马焕均. 基于改进下垂控制的逆变器并联运行技术[J]. 电力系统保护与控制, 2015,43(7):103-107.

Xu Yuqin, Ma Huanjun. Parallel operation technology of inverters based on improved droop control[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7):103-107.

[9] Li Y, Kao C. An accurate power control strategy for inverter based distributed generation units operating in a low voltage micro-grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(12):2977-2988.

[10] 刘海涛,吕志鹏,苏剑,等. 具有功率精确分配能力的逆变器电压谐波分频下垂控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015,43(19):9-14.

Liu Haitao, Lü Zhipeng, Su Jian, *et al.* Research on droop control method of inverter voltage harmonic frequency division with accurate power distribution capability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19):9-14.

[11] 艾欣,金鹏,孙英云. 一种改进的微电网无功控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013,41(7):147-155.

Ai Xin, Jin Peng, Sun Yingyun. An enhanced reactive sharing control strategy of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7):147-155.

[12] 康英伟,汪笃红,张经纬,等. 基于自适应虚拟电阻的低电压微电网多阻性逆变器下垂控制策略[J]. 科学技术与工程, 2017,12(10):45-50.

Kang Yingwei, Wang Duhong, Zhang Jingwei, *et al.* Droop control strategy for multi-resistive inverters of low voltage microgrid based on adaptive virtual impedance[J]. Science Tech-

(下转第73页)

- Huang Wujing, Zhang Ning, Dong Ruibiao, *et al.* Coordinated planning of multiple energy networks and energy hubs[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18):12-16.
- [15] 李红伟,朱海荣,颜欣黎,等.基于教与学模式改进一致性算法的电-气能量流协同优化[J].电力系统自动化,2019,43(11):17-24.
Li Hongwei, Zhu Hairong, Yan Xinli, *et al.* Collaborative optimization of electricity-gas energy flow using improved consensus algorithm with teaching-learning based optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11):17-24.
- [16] 柳明星,张恒,张伟,等.火星全球遥感探测器多学科建模与协同优化[J].航天返回与遥感,2017,38(5):57-67.
Liu Mingxing, Zhang Heng, Zhang Wei, *et al.* Multidisciplinary modeling and collaborative optimization of Mars global remote sensing probe[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2017, 38(5):57-67.
- [17] 江岳春,曾诚玉,郇嘉嘉,等.计及人体舒适度和柔性负荷的综合能源协同优化调度[J].电力自动化设备,2019,12(8):254-260.
Jiang Yuechun, Zeng Chengyu, Xun Jiajia, *et al.* Integrated energy coordinated optimal dispatch considering human comfort and flexible load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 12(8):254-260.
- [18] 王丹,孟政吉,贾宏杰,等.基于配置-运行协同优化的分布式能源站选型与定容规划[J].电力自动化设备,2019,3(8):152-160.
Wang Dan, Meng Zhengji, Jia Hongjie, *et al.* Distributed energy station selection and constant volume planning based on configuration-operation collaborative optimization[J]. Power Automation equipment, 2019, 3(8):152-160.
- [19] 王会杰,范才兵,江松,等.基于协同论的富全铁矿产能能源控制优化[J].矿业研究与开发,2018,6(5):88-93.
Wang Huijie, Fan Caibing, Jiang Song, *et al.* Optimization of production energy control in fuquan iron mine based on synergetics[J]. Mining Research and Revelopment, 2018, 6(5):88-93.
- [20] 刘蓉晖,李阳,孙改平,等.考虑含多种可控负荷的社区冷热电联供系统协同优化调度[J].可再生能源,2019,8(9):1317-1324.
Liu Ronghui, Li Yang, Sun Gaiping, *et al.* Coordinated optimal dispatch of community CCHP system considering multiple controllable loads[J]. Renewable Energy Resource, 2019, 8(9):1317-1324.
- [21] 李华东,李勇,李文博.考虑源网荷互动的虚拟发电厂分布式协同控制[J].电气传动,2019,49(3):72-77.
Li Huadong, Li Yong, Li Wenbo. Distributed cooperative control for virtual power plants considering interaction of source, network and load[J]. Electric Drive, 2019, 49(3):72-77.
- 收稿日期:2020-07-14
修改稿日期:2020-08-17
- ~~~~~
- (上接第17页)
- nology and Engineering, 2017, 12(10):45-50.
- [13] Gao Y, Ai Q. A distributed coordinated economic droop control scheme for islanded AC microgrid considering communication system[J]. Electric power systems research, 2018, 160(7):109-118.
- [14] Ma J, Wang X, Liu J, *et al.* An improved droop control method for voltage-source inverter parallel systems considering line impedance differences[J]. Energies, 2019, 12(6):215-219.
- [15] 王渝红,李天泽,曾琦,等.实际运行点动态修正的VSC-MTDC改进下垂控制策略[J].高电压技术,2018,44(7):2133-2142.
Wang Yuhong, Li Tianze, Zeng Qi, *et al.* Novel droop control strategy with dynamically corrected operating point for VSC-MTDC system[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7):2133-2142.
- [16] 李欣煜,周建萍,李泓青,等.基于粒子群算法的微电网实时功率均分的改进下垂控制策略[J].高电压技术,2018,44(10):3425-3432.
Li Xinyu, Zhou Jianping, Li Hongqing, *et al.* Improved droop control strategy for real-time power sharing of microgrid based on particle swarm optimization[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10):3425-3432.
- [17] 张宸宇,郑建勇,周福举,等.微网中一种具有环流抑制能力的改进下垂控制器[J].智能电网,2014,12(7):37-41.
Zhang Chenyu, Zheng Jianyong, Zhou Fujun, *et al.* An improved droop controller with circulating current restraining capability in micro-grid[J]. Smart Grid, 2014, 12(7):37-41.
- [18] 高坤,郑帅峰,辛宁怡,等.基于改进下垂控制的微电网无功控制技术[J].电力电容器与无功补偿,2018,39(5):149-154.
Gao Kun, Zheng Shuaifeng, Xin Ningyi, *et al.* Study on reactive power control technology of micro-grid based on improved droop control[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(5):149-154.
- [19] 张莹,沈虹,王雷,等.分布式并联逆变器解耦电流下垂控制技术[J].燕山大学学报,2015,12(4):63-68.
Zhang Ying, Shen Hong, Wang Lei, *et al.* Decoupling currnt droop control technique for distributed parallel inverters[J]. Journal of Yanshan University, 2015, 12(4):63-68.
- 收稿日期:2020-06-01
修改稿日期:2020-08-17