

DOI: 10.7667/PSPC180466

基于自调节下垂控制的分布式电源并联运行技术

柏管, 陈卓, 刘飞

(贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 在孤岛运行模式下, 各分布式电源并联运行时输电线路阻抗值存在差异, 采用传统的下垂控制难以实现无功功率输出按 DG 容量比例合理分配。针对该问题, 提出一种改进的自调节下垂控制策略, 该改进策略在传统无功-电压下垂控制基础上, 引入关于输出无功功率的比例积分控制环节后使无功功率输出与线路阻抗无关, 从而实现无功功率输出按 DG 容量比例合理分配, 抑制了系统无功环流分量。最后通过 Matlab 仿真平台搭建 DG 并联运行仿真模型验证了该改进策略的有效性。

关键词: 环流抑制; 改进下垂控制; 线路阻抗; 自调节; 功率分配

Parallel operation technology of distributed generation based on self-regulation droop control

BAI Guan, CHEN Zhuo, LIU Fei

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In distributed island mode, each distributed power source operates in parallel. Because of the difference in impedance values of transmission lines, it is difficult to achieve a reasonable distribution of reactive power output in proportion to the DG capacity using traditional droop control. To solve this problem, this paper proposes an improved self-regulating droop control strategy. Based on the traditional reactive-voltage droop control, the improved strategy introduces a proportional-integral control link on the output reactive power. Then, the reactive power output is independent of line impedance. In this way, the reactive power output can be reasonably distributed according to the DG capacity ratio, and the reactive circulating current component of the system is suppressed. Finally, the DG parallel operation simulation model is built by Matlab simulation platform to verify the effectiveness of the improved strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51567005) and Science and Technology Project of Guizhou Province (No. [2017]7230).

Key words: circulating current suppression; improved droop control; line impedance; self-regulation; power distribution

0 引言

多个分布式电源(Distributed Generation, DG)组成的低压微电网是高效利用新能源的一种新型方案^[1-3]。低压微电网的控制策略不仅要求能够在并网/孤岛两种工作模式下平滑切换, 而且要保证在孤岛模式运行下各 DG 能为负荷提供优质的电能^[4-7]。下垂控制是低压微电网经典控制策略之一^[8-10]。当微电网处于孤岛模式时各 DG 并联运行, 由于输电线路阻抗的差异, 采用传统下垂控制难以实现输出无功功率按照 DG 容量比例合理分配^[11-13]。

已有很多文献针对传统下垂控制中存在的局限

性进行研究并提出改进方案。文献[14]通过输出功率反馈调节下垂系数解决了线路阻抗差异问题, 达到了输出功率合理分配的目的。文献[15]针对三相负载不平衡及线路参数差异的问题, 采用基于PR控制器的负序虚拟复阻抗的设计方法, 减小了等效输出阻抗, 平衡了公共点出的电压从而抑制系统中的负序环流分量。文献[16]采用一种引入虚拟阻抗的新型反下垂控制方法, 以解决微电网中的线路阻抗不平衡的问题。文献[17]为解决线路阻抗不相等引起输出功率分配不精确的问题, 引入了输出电压的变化率动态调节其参考电压, 从而改善了输出功率合理分配的精度。文献[18]为解决低压微网的线路阻抗问题, 通过虚拟阻抗法把线路阻抗设置为阻性, 并采用在有功控制环中加入积分环节, 使功率输出与线路阻抗无关, 解决线路阻抗差异影响功率分配

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51567005); 贵州省科技计划项目资助(黔科合 LH 字[2017]7230)

不合理问题。但该方法存在加入虚拟阻抗会导致电压降落和积分环节的引入使系统动态性能变差的问题。文献[19]针对线路阻抗复杂特性, 提出动、静态下垂系数代替传统下垂系数, 同时配合开环电压补偿环, 使输出功率按DG容量比合理分配。但该方法的开环补偿电压环需精确测量线路阻抗。文献[20]针对低压微网线路阻抗不纯为抗性的情况, 提出“虚拟电抗法”来改进传统下垂控制。改进后实现了功率按容量比合理分配输出。该改进方法提出的电压补偿环节, 也需要得到准确的线路阻抗才能避免由于加入虚拟电抗而造成输出电压幅值出现较大跌落的问题。文献[21]针对加入较大的虚拟阻抗会引起较大电压降落的问题, 提出一种动态虚拟阻抗, 避免出现大幅度的电压低落, 同时改善了输出功率的合理分配的精度。

由传统下垂控制的功率传输特性可知, 传统下垂控制中无功功率输出与线路阻抗有关, 难以实现无功功率合理分配输出, 从而出现较大的无功环流^[22-23]。针对该问题, 本文提出了一种改进的自调节下垂控制策略, 使得输出无功功率与线路阻抗无关, 实现无功功率按DG容量比合理分配输出, 达到抑制系统无功环流的目的。仿真结果验证了该改进策略的有效性。

1 传统下垂控制及其功率传输特性分析

以图1所示的两台DG并联运行等效模型为例来分析下垂控制原理及其功率传输特性。

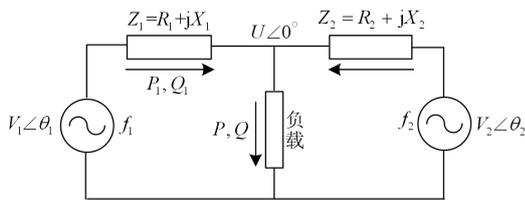


图1 两台DG并联运行等效模型

Fig. 1 Parallel operation of two DG equivalent model

图1中 V_i , R_i , X_i , θ_i 分别表示第 i 台DG的逆变器输出的电压、线路电阻、线路电抗、输出的电压相角。在低压线路中线路较短且滤波电感值较大, 故线路阻抗近似呈感性。由于输出的相电压相角 θ 很小, 则 $\sin\theta \approx \theta$, $\cos\theta \approx 1$, 则DG的逆变器的功率输出表达式可化简为

$$\begin{cases} P = \frac{UV}{X} \theta \\ Q = \frac{U(V-U)}{X} \end{cases} \quad (1)$$

上式表明在功率传输过程中, 有功功率和无功功率分别由输出的电压相角 θ 和输出电压幅值成一阶线性比例关系。由于相角 θ 难以直接控制而频率的积分为相角, 因此可采用频率来代替相角作为控制对象。此时传统的下垂控制方程可是表示为

$$\begin{cases} f = f_0 - m(P - P_0) \\ V = V_0 - n(Q - Q_0) \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_0 、 Q_0 为DG额定有功功率和无功功率; f 、 V 为DG输出电压频率和幅值; P 、 Q 为DG输出有功功率和无功功率; f_0 、 V_0 为DG的参考频率和参考电压幅值的额定值; m 、 n 为逆变器的有功功率和无功功率的下垂系数。由式(1)功率传输方程和式(2)下垂控制方程可得有功功率、无功功率控制框图(图2)。

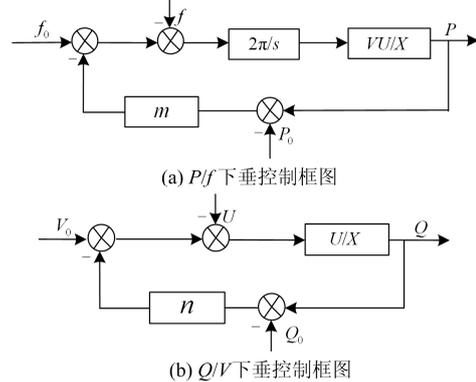


图2 有功功率、无功功率控制框图

Fig. 2 Diagram of active power and reactive power control

由图2, 可得DG的输出功率为

$$\begin{cases} P(s) = \frac{(f_0 - f + mP_0)2\pi UV}{sX + 2\pi mUV} \\ Q(s) = \frac{U(V_0 - U + nQ_0)}{X + nU} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)中有功功率输出表达可知, 当稳态时由于自然存在积分项, 此时忽略式中微分项则有有功功率输出与线路阻抗 X 无关^[24]。当两台相同额定容量DG并联运行时, 仅需设定相同的有功下垂系数即 $m_1=m_2$, 就能实现有功功率的合理分配。当两台不同额定容量DG并联运行时, 可通过设定有功下垂系数比等于DG容量比, 就能使输出有功功率按DG容量比合理; 而由式(3)中无功功率输出表达可知, 稳态时无功功率的输出与线路阻抗 X 有关。在相同额定容量的两台DG并联运行时, 需设定相同的无功下垂系数即 $n_1=n_2$, 并满足线路阻抗相等即 $X_1=X_2$, 才能合理分配输出无功功率。当两台不同容量DG并联运行时, 不仅要设定下垂系数比等于DG容量比, 而且需满足线路阻抗比与DG容量比成反比, 才能使输出无功功率按DG容量比合理分配。

实际中各 DG 线路的线路阻抗受诸多因素影响使线路阻抗比匹配 DG 容量比的条件十分苛刻, 因此 DG 输出无功功率受线路阻抗的影响, 使得输出无功功率分配不合理, 导致了 DG 之间出现较大的无功环流。

2 改进自调节下垂控制策略

本文所提下垂控制的原理如图 3 所示, 下垂控制分为功率控制外环和电压电流控制内环。功率控制外环通过采样系统中的电压电流以计算逆变器输出的有功功率与无功功率, 再将计算所得功率输入到下垂控制方程中分别得到电压和频率, 并将电压和频率合成三相参考电压 U_{ref} 后输入到电压电流控制内环。电压电流双环控制快速跟踪参考电压 U_{ref} 后输出参考波, 再将参考波输入到 PWM 脉冲发生器后为逆变器提供准确的触发脉冲。

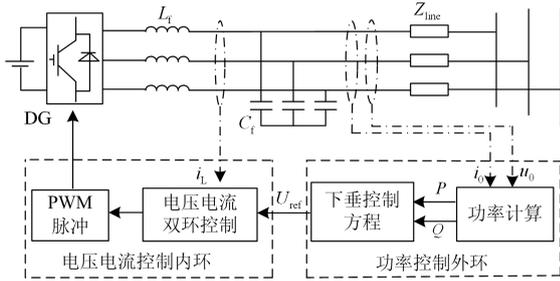


图 3 下垂控制原理图

Fig. 3 Principle diagram of droop control

2.1 改进功率控制外环的方法及理论分析

针对上述传统下垂控制中存在的问题, 本文提出一种改进自调节下垂控制方法。该方法在无功电压的下垂控制方程的基础上加入关于无功功率的比例积分控制环节, 得到改进无功下垂控制方程为

$$V = V_0 - n(Q - Q_0) + (K_p + K_1/s)(Q - Q_{期}) \quad (4)$$

式中: K_p 为比例放大系数; K_1 为积分比例系数; $Q_{期}$ 为期望输出的无功功率。由式(4)可得改进无功功率控制框图, 如图 4 所示。

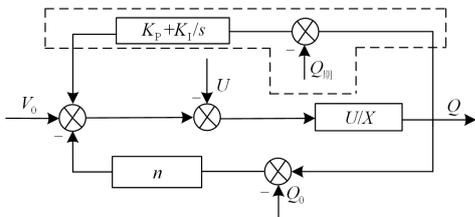


图 4 改进无功功率控制框图

Fig. 4 Diagram of improved reactive power control

由改进无功功率控制框图, 可得改进无功功率输出表达式为

$$Q(s) = \frac{sU(V-U) - Q_{期}K_1}{s(nU + X + UK_p) + UK_1} \quad (5)$$

由式(5)可知, 稳态时忽略式中微分项则输出无功功率与线路阻抗 X 无关、无功下垂系数 n 无关, 仅与公共点的电压幅值 U 、积分比例系数 K_1 和期望输出的无功功率 $Q_{期}$ 相关。若两台 DG 并联运行, 此时两 DG 的无功功率输出比为

$$\frac{Q_1(s)}{Q_2(s)} = \frac{(n_2U + X_2 + UK_p)s + UK_1}{(n_1U + X_1 + UK_p)s + UK_1} \cdot \frac{sU(V_1 - U) - K_1Q_{期1}}{sU(V_2 - U) - K_1Q_{期2}} \quad (6)$$

稳态时忽略式中微分项, 则两 DG 的无功功率输出比可以等效为

$$\frac{Q_1(s)}{Q_2(s)} = \frac{Q_{期1}}{Q_{期2}} \quad (7)$$

由式(7)可得改进后期望输出的无功功率比等于实际输出无功功率比, 故可以通过设计合理的期望输出的无功功率比实现无功功率按 DG 容量比分配输出, 抑制系统出现较大的无功环流。

由上述可得改进的功率控制环如图 5 所示。

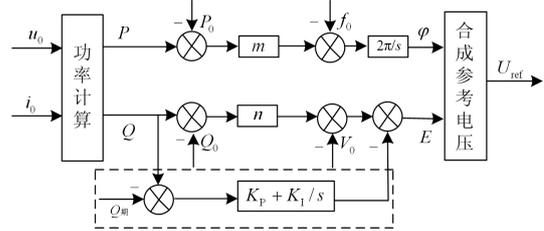


图 5 改进的功率控制环结构图

Fig. 5 Structure of improved power control loop

2.2 电压电流控制内环

本文采用如图 6 所示电压电流功率控制内环。

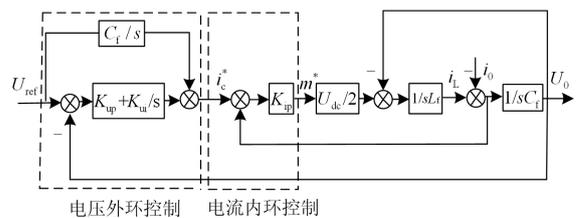


图 6 电压电流控制框图

Fig. 6 Diagram of voltage and current control

图中 C_f 、 L_f 分别为滤波电容值、滤波电感值。可得逆变器闭环传递函数和等效输出阻抗分别为

$$U_0 = G(s)U_{ref} - Z_0(s)i_0 \quad (8)$$

式中: U_{ref} 为参考电压; $Z_0(s)$ 为逆变器的等效输出阻抗; $G(s)$ 为电压比例增益传递函数。电压电流双环控制器通过设计合理参数, 确保快速跟踪参考电压 U_{ref} , 同时逆变器的等效输出阻抗 $Z_0(s)$ 在 50 Hz

频段附近为近似感性, 确保文中下垂控制的 P/f 和 Q/V 的线性下垂特性。

3 仿真验证

为验证改进自调节下垂控制策略的有效性, 在 Matlab 中搭建两台 DG 并联运行模型如图 7 所示, 两台 DG 的有功功率控制始终采用传统有功下垂控制, 对采用传统下垂控制与改进下垂控制两种情况下输出的无功功率进行对比分析。图中逆变器的额定电压幅值和额定频率分别为 311 V 和 50 Hz; DG 直流侧电压均为 800 V, 滤波电容均为 25 μ F, 滤波电感为 1.5 mH, 负荷为 $(10+j5)$ kVA。设定仿真时间为 1 s, 0.5 s 前采用传统下垂控制, 0.5~1 s 采用改进下垂控制, 其余相关参数根据不同的仿真场景设定。下面将在不同的仿真场景中对本 文所提出的改进下垂控制策略进行验证。

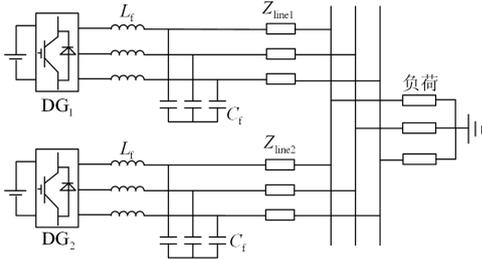


图 7 逆变器并联运行系统

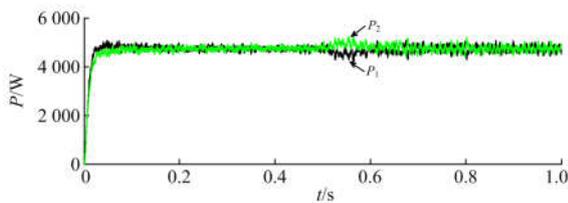
Fig. 7 Parallel operation model of the inverters

仿真场景 1: 两台 DG 额定容量相同, 线路阻抗不同。仿真参数见表 1, 仿真结果如图 8 所示。

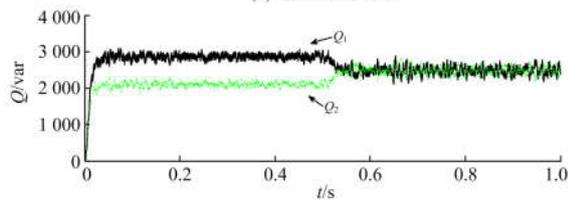
表 1 场景 1 仿真参数表

Table 1 Simulation parameters of scenario 1

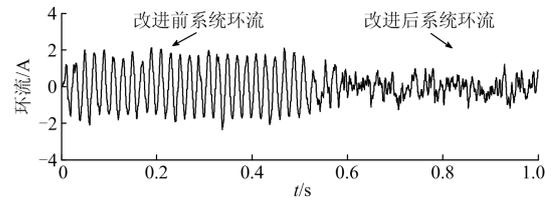
DG 序号	额定容量/ kVA	线路 电阻/ Ω	线路 电抗/ Ω	下垂系数 $m/(\times 10^{-5})$	下垂系数 $n/(\times 10^{-3})$
1	10+j5	0.32	0.078 5	-5	-1
2	10+j5	0.84	0.157	-5	-1



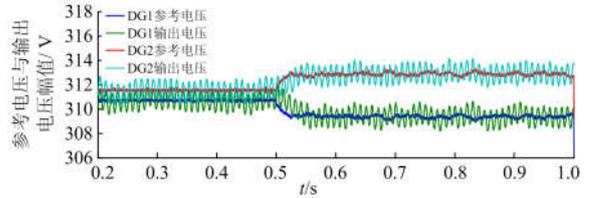
(a) 输出有功功率



(b) 输出无功功率



(c) 系统环流



(d) 参考电压与输出电压的幅值

图 8 场景 1 的仿真结果

Fig. 8 Simulation results of scenario 1

仿真结果如图 8 所示, 两台 DG 容量相同, 线路阻抗不同, 同时设置改进下垂策略中的期望输出的无功功率 $Q_{期1} = Q_{期2}$ 。当 0~0.5 s 时采用传统的下垂控制时, 由图 8(a)得 DG1 和 DG2 输出的有功功率为均约为 4.9 kW, 由图 8(b)得输出无功功率分别约为 2.9 kvar 和 2.2 kvar, 此时图 8(c)出现较大的系统环流。0.5~1 s 采用改进下垂控制, 此时 DG1 和 DG2 经过一个暂态调节过程后有功功率均约为 10 kW, 而无功功率输出都约为 2.5 kvar, 输出比例都约为 1。图 8(c)中系统环流明显减小。由图 8(d)可知, 改进前后输出电压幅值快速跟随参考电压幅值。

本文所提的下垂控制策略中实现了 PQ 解耦, 因此在改进前后无功功率的改变不会影响有功功率输出。同时, 文中 P/f 下垂控制中 f 为全局变量, 使输出的有功功率始终能够合理分配, 即 P1 和 P2 改进前后近似相等(改进后 P1 和 P2 出现短暂微小差异是由于解耦不完全所致), 出现了两条曲线近似重合的现象; 本文采用改进自调节下垂控制后, 由图 8(d)可知自调节各 DG 逆变器的参考电压幅值后消除了线路阻抗差异的影响, 实现功率的合理均分, 抑制了系统无功环流分量。

仿真场景 2: 两台 DG 额定容量不同, 线路阻抗相同。仿真参数见表 2, 仿真结果如图 9 所示。

表 2 场景 2 仿真参数表

Table 2 Simulation parameters of scenario 2

DG 序号	额定容量/ kVA	线路 电阻/ Ω	线路 电抗/ Ω	下垂系数 $m/(\times 10^{-5})$	下垂系数 $n/(\times 10^{-3})$
1	20+j10	0.32	0.078 5	-2.5	-0.5
2	10+j5	0.32	0.078 5	-5	-1

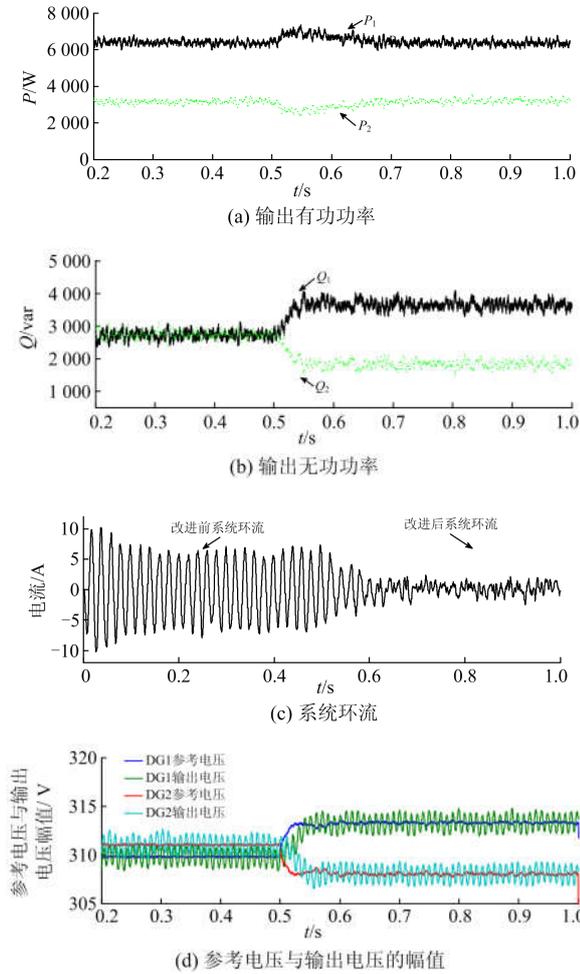


图 9 仿真场景 2 的仿真结果

Fig. 9 Simulation results of scenario 2

仿真结果如图 9 所示, 两台 DG 容量比例为 2:1, 线路阻抗相同, 同时设置改进下垂策略中的期望输出的无功功率 $Q_{期1} = 2Q_{期2}$ 。当 0~0.5 s 时采用传统的下垂控制时, 由图 9(a)得 DG1、DG2 输出的有功功率分别约为 6.5 kW 和 3.25 kW, 输出比例约为 2, 由图 9(b)得无功功率分别约为 2.65 kvar 和 2.65 kvar, 输出比例约为 1, 此时图 9(c)出现较大的系统环流。0.5~1 s 采用改进的下垂控制, 经过一个暂态后 DG1 和 DG2 输出的有功功率分别约为 6.5 kW 和 3.25 kW, 无功功率输出分别约为 3.5 kvar 和 1.75 kvar, 输出比例都约为 2, 此时图 9(c)中系统环流明显减小。由图 9(d)可知, 改进前后输出电压幅值快速跟随参考电压幅值。

由文分析可知稳态时, 改进前后有功功率能按 DG 容量比 2:1 合理分配输出。0~0.5 s 采用改进下垂控制前, 由于此时线路阻抗比为 1:1 不匹配 DG 容量比 2:1, 故无法按 DG 容量比 2:1 输出无功功率, 从而出现较大的系统环流。0.5~1 s 在设置期望输出

的无功功率 $Q_{期1} = 2Q_{期2}$ 后, 采用本文提出的改进自调节下垂控制, 通过自调节各 DG 逆变器的参考电压幅值后使无功功率按容量 DG 比 2:1 合理分配输出, 其结果明显抑制了系统环流。

仿真场景 3: 两台 DG 额定容量不同, 线路阻抗不同。仿真参数见表 3, 仿真结果如图 10 所示。

表 3 场景 3 仿真参数表

Table 3 Simulation parameters of scenario 3

DG 序号	额定容量/ kVA	线路 电阻/ Ω	线路 电抗/ Ω	下垂系数 $m/(\times 10^{-5})$	下垂系数 $n/(\times 10^{-3})$
1	20+j10	0.32	0.078 5	-2.5	-0.5
2	10+j5	0.84	0.157	-5	-1

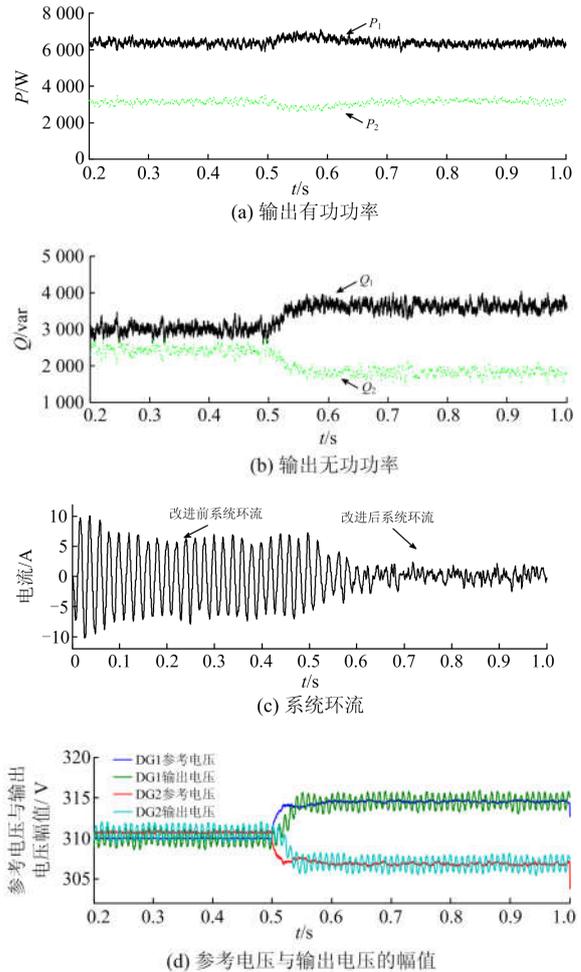


图 10 仿真场景 3 的仿真结果

Fig. 10 Simulation results of scenario 3

仿真结果如图 10 所示, 两台 DG 容量比例为 2:1, 输电线路阻抗不同, 同时设置改进下垂策略的期望输出的无功功率 $Q_{期1} = 2Q_{期2}$ 。当 0~0.5 s 时采用传统的下垂控制时由图 10(a)得 DG1 和 DG2 输出的

有功功率分别约为 6.5 kW 和 3.25 kW, 输出比例约为 2, 由图 10(b)得无功功率输出分别约为 3 kvar 和 2.2 kvar, 输出比例约为 1.36, 此时图 10(c)出现较大的系统环流; 0.5~1 s 采用改进自调节下垂控制, 经过一个暂态后 DG1 和 DG2 输出的有功功率分别约为 6.5 kW 和 3.25 kW, 无功功率输出分别为 3.5 kvar 和 1.75 kvar, 输出比例都约为 2。

由前文分析可知, 本文在采用改进自调节下垂控制后, 通过自调节各 DG 逆变器的参考电压从而使各 DG 逆变器输出无功功率为期望值 $Q_{期}$ 。达到无功功率按 DG 容量比合理分配输出及抑制了系统环流的目的。

从三个仿真场景的系统环流仿真结果来看, 本文方法在无功环流分量的抑制方面取得较好的效果, 但系统环流都不同程度地引入了高次谐波, 主要原因是采用改进策略后两台逆变器的参考电压出现较大的波动, 引起逆变器间相对的参考电压差异更明显, 即经电压电流双环控制后导致了两台 DG 的参考波的幅值和相位差变大如图 11 所示, 从而引入了高次谐波。

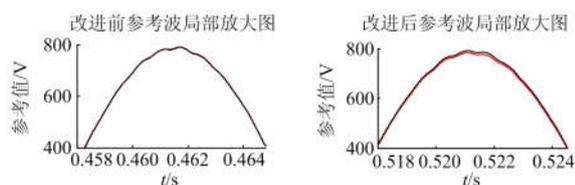


图 11 DG 的参考波

Fig. 11 Reference waves of DG

4 结论

本文通过分析传统下垂控制的功率传输特性, 得到无功功率的输出与各 DG 线路阻抗有关的是难以实现无功功率按 DG 容量比输出合理分配的原因。

针对该问题, 本文提出自调节下垂控制策略。该改进策略在传统无功下垂控制方程中引入关于无功功率比例积分控制环节, 并推导出改进后的无功功率输出表达式。分析采用改进策略后的无功功率输出表达式可知, 改进后 DG 逆变器输出无功功率与线路阻抗无关, 并可通过设置期望输出的无功功率比, 达到无功功率按 DG 容量比合理分配输出及抑制系统无功环流分量的目的。仿真结果证明了该改进策略的可行性。

参考文献

- [1] 朱珊珊, 汪飞, 郭慧, 等. 直流微电网下垂控制技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 72-84.
ZHU Shanshan, WANG Fei, GUO Hui, et al. Overview of droop control in DC microgrid[J]. Proceedings of the
- CSEE, 2018, 38(10): 72-84.
- [2] 朱一听, 卓放, 王丰, 等. 用于微电网无功均衡控制的虚拟阻抗优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4552-4563.
ZHU Yixin, ZHUO Fang, WANG Feng, et al. Virtual Impedance optimization method for microgrid reactive power sharing control[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4552-4563.
- [3] 李红萍, 杨洪耕, 曾巧燕, 等. 孤岛型微电网中改进下垂控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(4): 49-54.
LI Hongping, YANG Honggeng, ZENG Qiaoyan, et al. Improved droop control strategy for islanded microgrid[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2017, 29(4): 49-54.
- [4] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-22.
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-22.
- [5] 姚骏, 杜红彪, 周特, 等. 微网逆变器并联运行的改进下垂控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 932-938.
YAO Jun, DU Hongbiao, ZHOU Te, et al. Improved droop control strategy for inverters parallel operation in micro-grid[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 932-938.
- [6] CARVALHO P M S, FERREIRA L, ILIC M D. Distributed energy resources integration challenges in low-voltage networks: voltage control limitations and risk of cascading[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1): 82-88.
- [7] 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, 34(1): 57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on microgrid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [8] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids-a general approach toward standardization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.
- [9] BIDRAM A, DAVOUDI A. Hierarchical structure of microgrids control system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1963-1976.
- [10] HAIDER S, LI Guojie, WANG Keyou. A dual control strategy for power sharing improvement in islanded mode of ac microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 111-118. DOI: 10.1186/s41601-018-0084-2.

[11] 王逸超, 罗安, 金国彬. 微网逆变器的改进鲁棒下垂多环控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 116-123.
WANG Yichao, LUO An, JIN Guobin. Improved robust droop multiple loop control for parallel inverters in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 116-123.

[12] ZAMANI M A, SIDHU T S, YAZDANI A. Investigations into the control and protection of an existing distribution network to operate as a microgrid: a case study[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(4): 1904-1915.

[13] SHUAI Zhikang, MO Shanglin, WANG Jun, et al. Droop control method for load share and voltage regulation in high-voltage microgrids[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(1): 76-86.

[14] 孙孝峰, 杨雅麟, 赵巍, 等. 微电网逆变器自适应下垂控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2386-2391.
SUN Xiaofeng, YANG Yalin, ZHAO Wei, et al. An adaptive droop control method for inverters in microgrid[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2386-2391.

[15] 屈克庆, 李文旗, 赵晋斌, 等. 孤岛微网不平衡负荷下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 8-14.
QU Keqing, LI Wenqi, ZHAO Jinbin, et al. Islanded microgrid control strategy under unbalanced loads[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 8-14.

[16] 麦倩屏, 陈鸣. 用于多微源低压微电网的虚拟阻抗反下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 96-102.
MAI Qianping, CHEN Ming. P-V/Q-f droop control strategy with virtual impedance for low-voltage microgrid with multiple micro sources[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 96-102.

[17] 程启明, 高杰, 程尹曼, 等. 一种适用于孤岛运行的逆变器控制方法[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 203-209.
CHENG Qiming, GAO Jie, CHENG Yinman, et al. An inverter control method for islanding operation[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 203-209.

[18] 张宸宇, 梅军, 郑建勇, 等. 一种适用于低压微电网的改进型下垂控制器[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 53-59.
ZHANG Chenyu, MEI Jun, ZHENG Jianyong, et al. Improved droop controller for low-voltage microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 53-59.

[19] 杜燕, 苏建徽, 张榴晨, 等. 改进负荷分配的孤岛微网下垂控制方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 24-29.
DU Yan, SU Jianhui, ZHANG Liuchen, et al. A droop control method for improving load distribution in an island microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 24-29.

[20] 梁海峰, 郑灿, 高雅静, 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.

[21] 闫俊丽, 彭春华, 陈臣. 基于动态虚拟阻抗的低压微电网下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 1-6.
YAN Junli, PENG Chunhua, CHEN Chen. Droop control strategy based on dynamic virtual impedance in low-voltage microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 1-6.

[22] 刘宁宁, 曹炜, 赵晋斌, 等. 直流微电网的一种增量式下垂控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 24-30.
LIU Ningning, CAO Wei, ZHAO Jinbin, et al. An incremental droop control method for DC micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 24-30.

[23] 胡应宏, 邓春, 王劲松, 等. 变流器并列运行系统中非特征谐波环流分析及其抑制方法[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2169-2174.
HU Yinghong, DENG Chun, WANG Jinsong, et al. Analysis on non-characteristic harmonic circulating current in parallel inverter system and its suppression measures[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2169-2174.

[24] 陈燕东, 罗安, 龙际根, 等. 阻性逆变器并联环流分析及鲁棒下垂多环控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 18-29.
CHEN Yandong, LUO An, LONG Jigen, et al. Circulating current analysis and robust droop multiple loop control method for parallel inverters using resistive output impedances[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(18): 18-29.

收稿日期: 2018-04-23; 修回日期: 2018-07-03

作者简介:

柏管(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微网的运行与控制; E-mail: 277861194@qq.com

陈卓(1980—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: chzh1230@163.com

刘飞(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: 1031786519@qq.com

(编辑 姜新丽)