

DOI: 10.7667/PSPC180543

微网分段动态自适应下垂控制策略研究

杨海柱, 岳刚伟, 康乐

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 微电网采用传统下垂控制时, 存在着动态调节速度慢、微源功率分配不均、频率电压无法稳定等诸多弊端。为解决以上问题, 提出一种分段动态自适应下垂控制策略。通过分段下垂控制增大下垂系数, 以提升系统动态响应速度。通过动态下垂控制调节下垂系数, 以改善功率分配效果。通过自适应下垂控制平移下垂曲线, 以维持频率和电压稳定。对上述控制策略分别进行了仿真和实验, 结果验证了分段下垂自适应下垂控制策略的快速性、精确性和稳定性。

关键词: 微电网; 下垂控制; 响应速度; 功率均分; 系统稳定

Research on piecewise dynamic adaptive droop control strategy for microgrid

YANG Haizhu, YUE Gangwei, KANG Le

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: When traditional droop control is used in microgrid, there are many disadvantages, such as slow speed of dynamic regulation, uneven distribution of micro source power, unstable frequency and voltage, etc. To solve the above problems, a segmented dynamic adaptive droop control strategy is proposed. The droop coefficient is increased by piecewise droop control to improve the dynamic response speed of the system. The droop coefficient is adjusted by dynamic droop control to improve the power distribution effect. Adaptive droop control moves the droop curve to maintain frequency and voltage stable. Simulation and experiments are carried out on the above control strategies. The results verify the rapidity, accuracy and stability of the improved droop control strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1504623).

Key words: microgrid; droop control; respond speed; power distribution; system stability

0 引言

近年来, 微电网作为最有效的分布式能源集成方式得到了广泛发展^[1]。微电网由分布式微源、电能转换设备、负荷及保护装置组成, 可以实现自我管理^[2]。微网孤岛运行时, 通常采用下垂控制。下垂控制是模拟传统同步发电机组调频调压的一种控制方法^[3], 可实现“即插即用”。但也存在着诸多问题, 如何协调动态调节速度与功率输出范围之间的矛盾, 如何实现负荷的合理分配, 如何保证频率电压稳定等。因此, 对下垂控制策略的改进一直是研究的热点^[4]。

针对下垂系数响应速度和稳定性之间的矛盾, 一般要对下垂曲线进行改进。文献[5]研究了分段

滞环下垂控制策略, 可有效缓解响应速度和稳定性之间的矛盾。但在分段点处不可导, 影响系统稳定。文献[6]基于拉格朗日插值算法对下垂控制策略进行改进, 可实现功率稳定输出, 但忽略了线路阻抗的影响。针对多逆变器并联运行功率分配不均的问题, 一般通过在下垂方程中加入特定项进行改善。文献[7]通过引入功率与下垂系数一次项、功率与时间微分项, 来改善功率分配效果。文献[3]以直流微电网为对象, 提出了P-V下垂控制方法, 减少了系统环流。文献[8-9]提出了基于虚拟阻抗的改进下垂控制方法, 功率均分效果较好, 但参数设计过于复杂。文献[10-11]基于线路阻抗差异, 通过引入电压幅值反馈来实现功率均分, 取得了较好的分配效果。针对下垂控制频率和电压偏移问题, 一般要进行二次调节, 可通过积分平移下垂曲线或者调节下垂系数实现。文献[12]提出了一种基于一致性算法的无

基金项目: 国家自然科学基金资助(U1504623)

差调频方法, 但存在着算法复杂、收敛速度慢等缺点。文献[13]通过采用模糊逻辑自适应调整下垂系数, 实现频率和电压的稳定。文献[14]基于半实物仿真平台 RT-LAB 对直流微电网的二次调压进行了实验仿真研究。文献[15]将自适应下垂应用在风光储能系统中, 由于系统较为复杂, 控制精度较低。

为全面解决微网传统下垂控制在响应速度、功率分配、运行稳定等方面的问题, 本文提出分段动态自适应下垂控制策略。通过对传统下垂曲线进行分段、曲线化、平移处理, 使其既可以实现较快的动态响应速度, 又可实现良好的功率分配, 还可维护孤岛状态下频率电压稳定。

1 传统下垂控制

下垂控制模拟传统同步发电机组的运行特点, 利用频率与有功功率、电压与无功功率的关系进行调频调压。目前, 这种方法被广泛应用于独立微网中的逆变器控制。下面以图 1 所示两个并联微源对下垂控制进行具体说明。

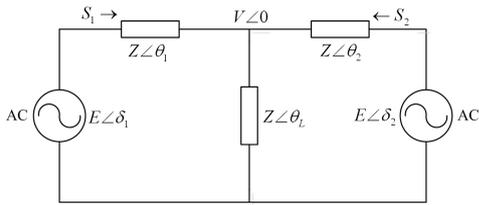


图 1 微源下垂控制模型

Fig. 1 Droop control model of micro sources

由图 1 可求得微源向负荷 Z 提供的功率表达式为

$$\begin{cases} P_i = \frac{E_i V}{Z_i} \cos(\theta_i - \delta_i) - \frac{V^2}{Z_i} \cos \theta_i & (i=1,2) \\ Q_i = \frac{E_i V}{Z_i} \sin(\theta_i - \delta_i) - \frac{V^2}{Z_i} \sin \theta_i & (i=1,2) \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_i 和 Q_i 分别为微源输出有功功率和无功功率; Z_i 和 θ_i 分别为线路阻抗值和阻抗角; E_i 和 δ_i 分别为微源的电压幅值和相角; V 为系统母线电压幅值。由式(1)可知, 微源输出有功功率和无功功率与微源电压的幅值和相角有关, 当线路的阻抗以感性为主时, 即 $X \gg R$ 时, $Z \angle \theta = X \angle 90^\circ$ 且功角较小时, 即 $\sin \delta \approx \delta$, $\cos \delta \approx 1$, 则式(1)可变为式(2)。

$$\begin{cases} P_i = \frac{E_i V}{Z_i} \delta_i & (i=1,2) \\ Q_i = \frac{E_i V - V^2}{Z_i} & (i=1,2) \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知, 微源的有功功率输出是通过改变系统的相位即功角 δ_i 来实现, 无功功率输出时通过改变系统的电压幅值 E_i 来实现, 从而实现微源有功和无功的解耦控制, 由此得到频率与有功、电压幅值和无功的下垂特性曲线如图 2 所示, 下垂公式如式(3)所示。

$$\begin{cases} f = f_n - m(P - P_n) & 0 \leq P \leq P_{\max} \\ V = V_n - nQ & Q_{\min} \leq Q \leq Q_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

式中: m 代表有功-频率(P - f)下垂系数; n 为无功-电压幅值(Q - V)下垂系数。

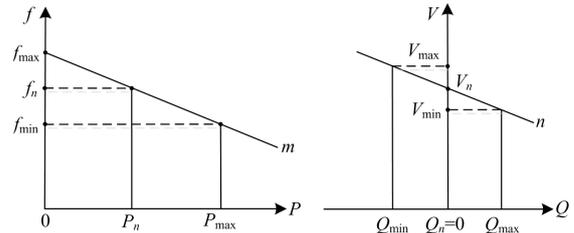


图 2 传统下垂控制原理图

Fig. 2 Traditional droop control principle diagram

传统下垂控制虽然控制原理简单, 且易于实现, 但仍然存在一些弊端。传统下垂系数为固定值, 存在动态调节速度和功率输出范围之间的矛盾。当多逆变器并联运行时, 下垂控制容易造成功率分配不均, 产生环流等现象; 传统下垂控制为有差调节, 无法维持频率电压恒定。因此, 需对传统下垂控制进行改进。

2 改进下垂控制

2.1 改进下垂控制原理

下垂控制存在着动态响应速度和功率输出范围的矛盾, 下垂系数大, 则动态响应速度快, 但频率和电压偏移较大, 稳定性较差; 下垂系数小, 则动态响应速度慢, 但频率和电压偏移较小, 稳定性较好。为此提出一种分段下垂控制策略, 如图 3 所示。

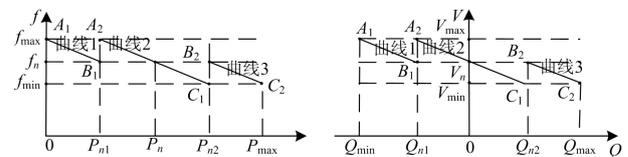


图 3 分段下垂控制

Fig. 3 Subsection droop control

其基本思想是: 使用三条下垂斜率较大的下垂特性曲线 A_1B_1 、 A_2C_1 和 B_2C_2 代替一条下垂斜率较小的下垂特性曲线 A_1C_2 。以 P - f 为例, 假定初始时刻系统运行在 A_1 点, 负载增加系统沿着曲线 1 向下运动, 当运行至 B_1 点时, 负载继续增加, 则跳至曲

线 2 继续向下运动, 同理, 当运行至 C_1 点时, 负载继续增加, 则跳至曲线 3 继续向下运动。

分段下垂公式可表示为

$$\begin{cases} f = \begin{cases} f_{\max} - mP, & 0 \leq P \leq P_{n1} \\ f_{\max} - m(P - P_{n1}), & P_{n1} \leq P \leq P_{n2} \\ f_{\max} - m(P - P_n), & P_{n2} \leq P \leq P_{\max} \end{cases} \\ V = \begin{cases} V_{\max} - n(Q - Q_{\min}), & Q_{\min} \leq Q \leq Q_{n1} \\ V_{\max} - n(Q - Q_{n1}), & Q_{n1} \leq Q \leq Q_{n2} \\ V_{\max} - nQ, & Q_{n2} \leq Q \leq Q_{\max} \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

式中, m 、 n 分别为分段有功和无功下垂系数。

下垂控制存在着功率均分效果与频率电压控制精度之间的矛盾, 如图 4 所示。以 $P-f$ 为例, 当有多台功率相同的逆变器并联运行时, 由于空载频率不可能达到完全一致, 因此, 在接入同一负载时, 其功率均分效果是不一样的。 m 和 m^* 分别为两个大小不同的有功下垂系数, Δf 和 Δf^* 分别为对应参考频率为 f_0 的频率跌落, ΔP 和 ΔP^* 分别为接入同一负载时的功率分配差值。由图 4 可知, $\Delta f < \Delta f^*$, $\Delta P > \Delta P^*$, 这表明下垂系数越小, 频率偏差越小, 稳定性越好, 但功率均分效果较差。为此, 提出一种动态下垂控制, 如图 5 所示。

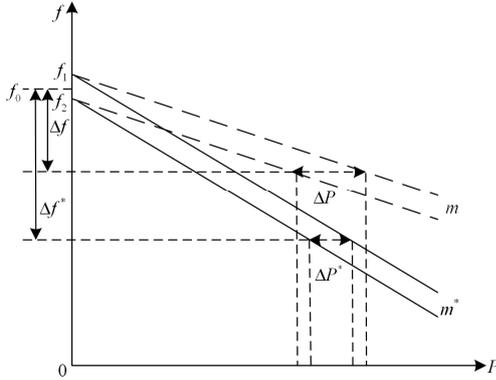


图 4 有功下垂控制特性曲线

Fig. 4 Active droop control characteristic curve

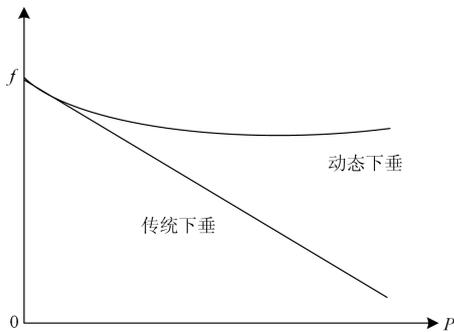


图 5 动态下垂控制

Fig. 5 Dynamic droop control

其基本思想是: 用一条斜率实时变化的曲线, 代替固定下垂系数的曲线。通过在原有下垂控制方程中引入与功率相关一次项, 使下垂系数随功率实时动态变化。以 $P-f$ 为例, 当负载增加时, 分担有功率较多的逆变器经动态下垂处理后, 其有功下垂系数相对增大, 有功功率输出减小, 实际有功下垂系数减小, 频率跌落降低; 分担较少有功功率的逆变器经动态下垂处理后, 其有功下垂系数相对减小, 有功功率输出增大, 实际有功下垂系数减小, 频率跌落降低。

动态下垂公式可表示为

$$\begin{cases} f = f_0 - (m - m'P)P \\ V = V_0 - (n - n'Q)Q \end{cases} \quad (5)$$

式中, m' 、 n' 分别为动态有功和无功下垂系数。

下垂控制还存在着频率和电压无法稳定的缺点, 下垂控制为有差控制, 当负荷变化时通过调整频率和电压维持功率平衡。为此提出一种自适应下垂控制, 如图 6 所示。

其基本思想是: 利用积分平移下垂曲线, 以保证频率和电压稳定。以 $P-f$ 为例, 假定系统初始时刻工作在 A 点, 当有功功率增加导致频率下降至 C 点时, 此时如果保持下垂曲线斜率不变向右平移, 使运行工作点平滑移动至 B 点, 则频率恢复稳定。

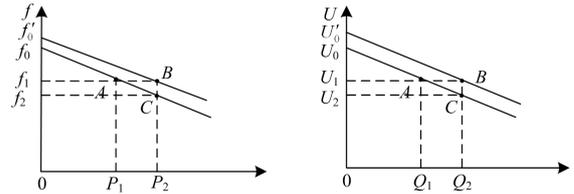


图 6 自适应下垂控制

Fig. 6 Adaptive droop control

自适应下垂公式可表示为

$$\begin{cases} f = f'_0 - mP \\ f'_0 = f_0 + (k_{fp} + \frac{k_{fi}}{s})(f_{\text{ref}} - f_i) \\ V = V'_0 - nQ \\ V'_0 = V_0 + (k_{vp} + \frac{k_{vi}}{s})(V_{\text{ref}} - V_i) \end{cases} \quad (6)$$

式中: f'_0 、 V'_0 分别为自适应空载频率和空载电压; k_{fp} 、 k_{fi} 、 k_{vp} 、 k_{vi} 分别为频率环和电压环的比例积分作用系数。

综上, 提出一种分段动态自适应下垂控制策略, 如图 7 所示。其基本思想是: 先实现分段下垂, 再实现动态下垂, 最后实现自适应下垂, 维持频率和电压稳定。以 $P-f$ 为例, 假设系统初始时刻工作在

D点, 当有功功率增加则由分段下垂移动至 D_1 点, 再由动态下垂移动到 D_2 点, 最后自适应下垂移动到 D_3 点。

分段动态自适应下垂方程可表示为

$$f = \begin{cases} f'_{\max} - (m - m'P)P & 0 \leq P \leq P_{n1} \\ f'_{\max} - (m - m'P)(P - P_{n1}) & P_{n1} \leq P \leq P_{n2} \\ f'_{\max} - (m - m'P)(P - P_n) & P_{n2} \leq P \leq P_{\max} \end{cases}$$

$$V = \begin{cases} V'_{\max} - (n - n'Q)(Q - Q_{\min}) & Q_{\min} \leq Q \leq Q_{n1} \\ V'_{\max} - (n - n'Q)(Q - Q_{n1}) & Q_{n1} \leq Q \leq Q_{n2} \\ V'_{\max} - (n - n'Q)Q & Q_{n2} \leq Q \leq Q_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中: m 、 n 分别为分段有功和无功下垂系数; m' 、 n' 分别为动态有功和无功下垂系数; f'_{\max} 、 V'_{\max} 分别为自适应空载频率和电压。

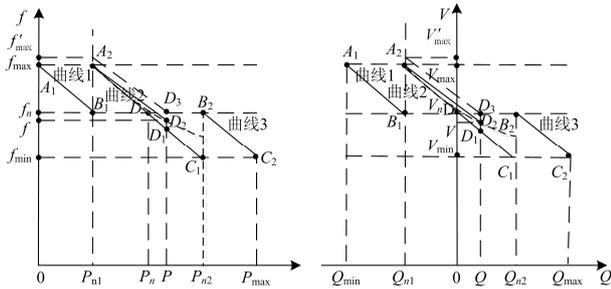


图7 分段动态自适应下垂控制

Fig. 7 Subsection dynamic adaptive droop control

2.2 改进下垂控制参数设计

改进下垂控制结构仍为典型三环控制系统^[16-18], 由功率外环和电压电流内环构成。与传统下垂控制不同的是, 功率控制器部分增加了分段下垂控制、动态下垂控制、自适应下垂控制三个环节。其中, 分段下垂环节主要用于根据负载功率选择合适的下垂特性曲线, 动态下垂控制环节主要用于将下垂曲线呈动态变化, 自适应下垂控制环节主要用于实现频率和电压无静差。

分段下垂系数的大小由图3推理得到

$$\begin{cases} m = 2m^* \\ n = 2n^* \end{cases} \quad (8)$$

式中, m^* 、 n^* 为传统下垂系数。

动态下垂系数的大小同样根据传统下垂系数计算。电网允许电压波动为5%以内, 允许频率波动为2%以内。以有功动态下垂系数 m' 为例, m' 在同取值时的动态下垂曲线如图8所示, P_n 为额定有功功率50 kW。当 $m' = 0$ 时, 对传统下垂控制没有抑制效果; 当 $m' = m/P_n$ 时, 虽然可恢复至额定功率, 但环流抑制失去作用。因此, 基于逆变器的额定有

功功率, 一般设计动态下垂系数 m' 为 $0.4m/P_n$ 与 $0.7m/P_n$ 之间。同理, n' 也根据逆变器的额定无功功率来确定。

自适应下垂通过PI控制实现, 其实现框图如图9所示。PI控制器的输入分别为输出频率电压与额定频率电压的差值, PI控制器的输出分别用于调节空载频率和空载电压, PI参数设计参考文献[19-20]。

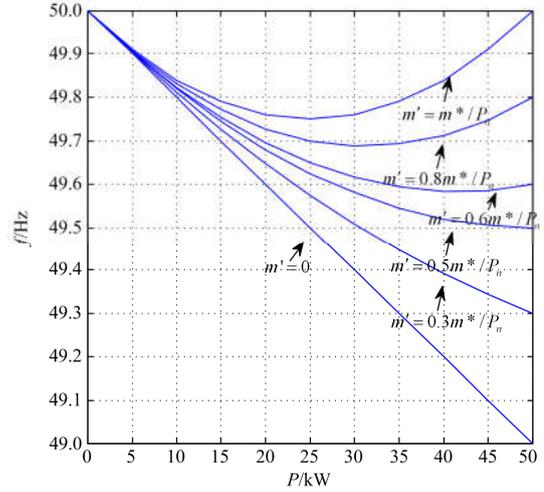


图8 m' 不同时的动态下垂曲线

Fig. 8 Dynamic droop curve with different m'

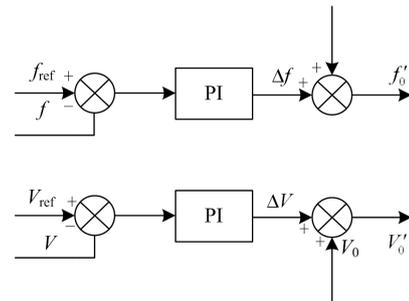


图9 PI控制框图

Fig. 9 PI control diagram

3 仿真与实验

在 Matlab/Simulink 中建立下垂控制仿真模型, 如图10所示。图中 DG 为直流源, 系统中有 Load1、Load2 和 Load3 3 个负载, 微网交流母线通过公共端 PCC 接入大电网。逆变器输入电压 $U_{DC} = 800$ V, 输出电压 $U = 311$ V, 开关频率为 10 kHz, 输出 LC 滤波器, $L_n = 0.6$ mH, $C_n = 1.5$ mF。分别应用分传统下垂控制策略、分段下垂控制策略、动态下垂控制策略、自适应下垂控制策略以及分段动态自适应下垂控制策略进行仿真。在 0.5 s、1 s 时增加负载, 1.5 s、2 s 时减少负载, 2.5 s 时并网, 仿真时间为 3 s。

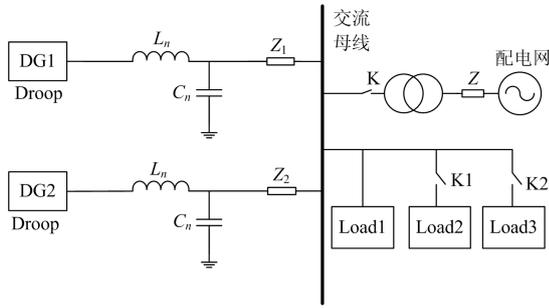


图 10 下垂控制结构图

Fig. 10 Droop control structure

仿真得到系统频率和电压波形如图 11、图 12 所示，DG1 和 DG2 输出的有功、无功功率如图 13、14 所示。

考虑到均分效果的精确性，对采用分段动态自适应下垂控制策略的 DG1 和 DG2 输出有功和无功功率分别进行对比，如图 15 所示。对采用分段动态自适应下垂控制策略的 DG1 和 DG2 输出电流进行对比，并截取时间 0.9~1.1 s 的曲线，如图 16 所示。

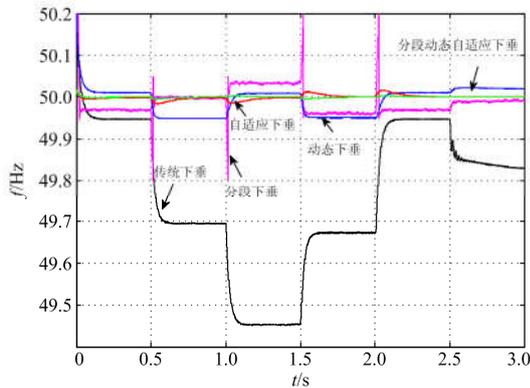


图 11 不同下垂控制策略频率输出对比图

Fig. 11 Comparison of frequency output of different droop control strategies

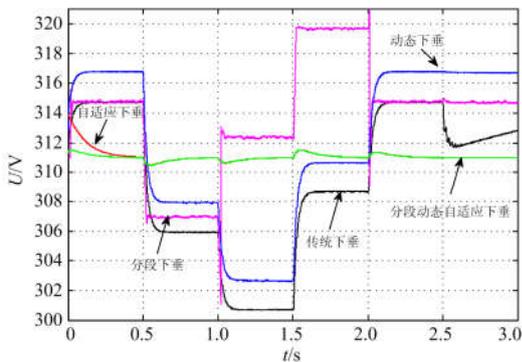
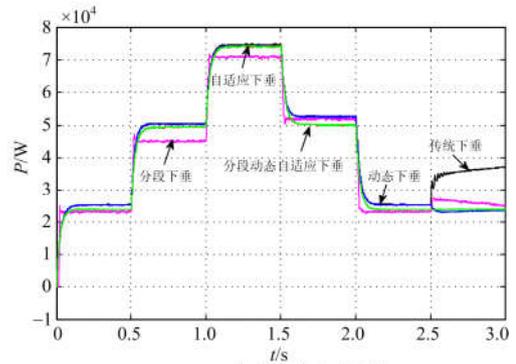
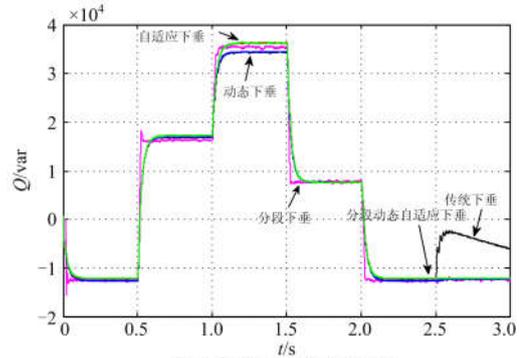


图 12 不同下垂控制策略电压输出对比图

Fig. 12 Comparison of voltage output of different droop control strategies



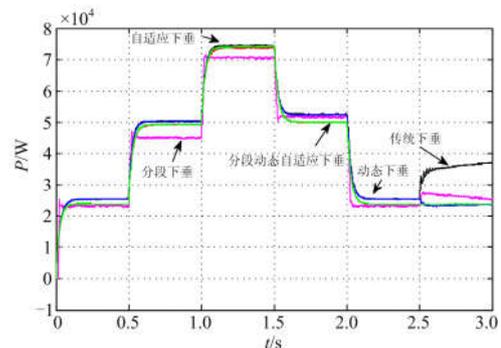
(a) DG1输出有功功率对比



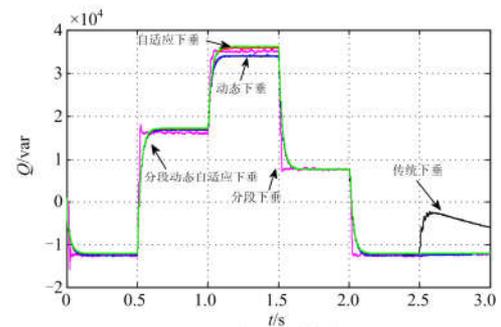
(b) DG1输出无功功率对比

图 13 不同下垂控制策略 DG1 输出的有功功率和无功功率

Fig. 13 DG1 output active power and reactive power of different droop control strategies



(a) DG2输出有功功率对比



(b) DG2输出无功功率对比

图 14 不同下垂控制策略 DG2 输出的有功功率和无功功率

Fig. 14 DG2 output active power and reactive power of different droop control strategies

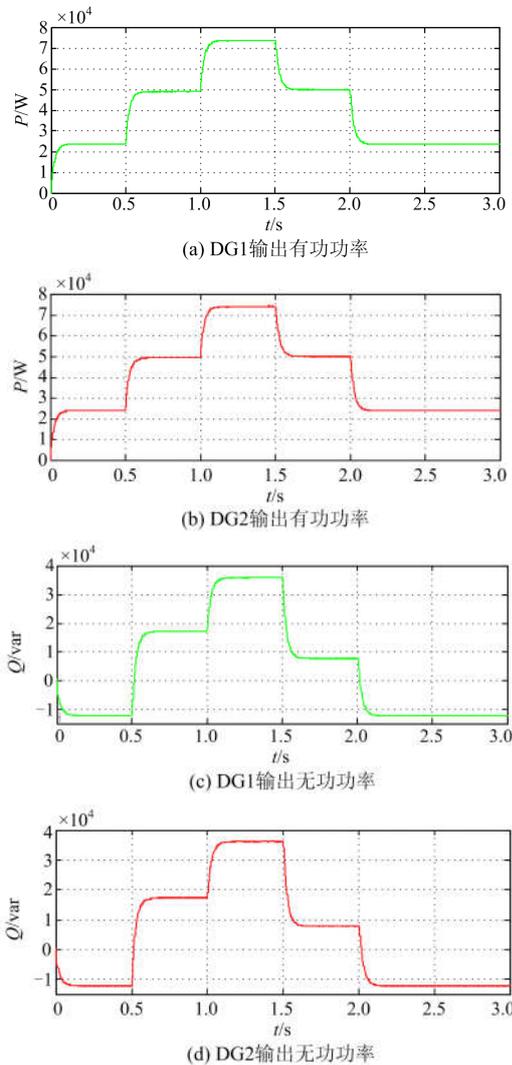


图 15 输出有功功率和无功功率对比图

Fig. 15 Comparison of output active power and reactive power

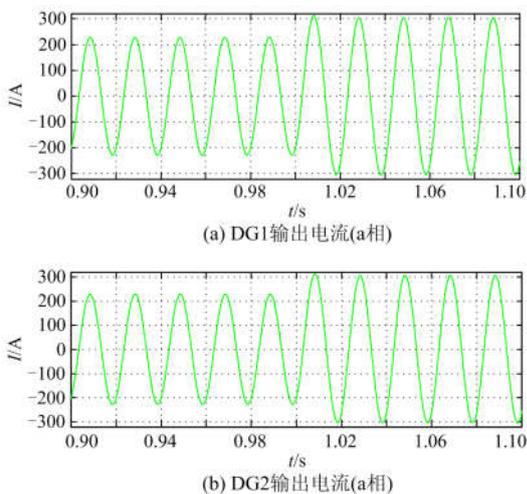


图 16 DG1 和 DG2 输出电流对比图

Fig. 16 DG1 and DG2 output current contrast diagram

由图 11、图 12 可知, 5 种下垂控制策略对频率和电压输出有着不同的仿真结果。采用传统下垂控制时, 在 0.5 s、1 s 时随着输出功率增加, 输出频率和电压会持续减小, 频率最小接近 49.4 Hz, 远远偏离额定频率 50 Hz; 电压最小达到 300 V, 远远偏离额定电压 311 V; 在 1.5 s、2 s 时随着输出功率减少, 输出频率和电压会持续增加; 2.5 s 时并网运行, 系统将由大电网维持, 频率和电压发生明显振荡。采用分段下垂控制时, 无论功率增加还是减少, 频率和电压动态响应速度加快, 波动范围降低, 频率基本维持在 ± 0.2 Hz 以下, 电压基本维持在 ± 10 V 以下。且在并网过程中, 频率和电压也可迅速恢复至额定值。但在功率动态平衡过程中, 伴随有较大频率波动, 不利于系统的稳定性。采用动态下垂控制, 明显减小了频率和电压跌落, 且频率和电压调整过程较为平滑, 稳定性较好, 但频率和电压仍然存在偏差。采用自适应下垂控制, 仿真过程中频率可维持稳定在 50 Hz 附近, 电压可维持稳定在 311 V 附近, 但其调整时间较长。采用分段自适应下垂控制, 其频率和电压波动范围最小, 调整时间最短, 响应速度较快, 且始终维持输出频率为 50 Hz, 输出电压为 311 V, 取得了较好的控制效果。

由图 13、图 14 可知, 5 种下垂控制策略基于不同的下垂原理皆能实现功率平衡。当有功和无功负载增加或减少时, 功率输出曲线对应上升或下降。5 种功率和电流输出曲线中, 分段动态自适应下垂控制动态过程最好, 曲线过渡最为平滑, 波动范围较小, 响应速度较快。

由图 15 可知, 无论负载增加还是减少, 采用分段动态自适应下垂控制策略, DG1 和 DG2 承担的有功和无功功率基本相同, 功率均分效果较好。由图 16 可知, 当负载增加时, 采用分段动态自适应下垂控制策略, 两台逆变器输出电流大小相同、相位一致, 电流均分效果良好。

为进一步验证该控制策略的有效性, 基于 RT-LAB 半实物仿真平台进行实验, 主电路在 RT-LAB 中搭建, 外围控制电路由 DSP28335 进行控制, 通过改变负载模拟功率变化, 应用分段动态自适应下垂控制策略, 得到实验波形如图 17 所示。

由图 17 可知, 当负载增加时, 根据改进下垂控制原理, 系统频率稍微降低, 但可迅速恢复至 50 Hz 并保持不变; 系统电压稍微降低, 但同样迅速恢复至 311 V 并保持不变; DG 输出电流增大, 维持功率平衡。当负载保持不变时, 频率、电压、DG 输出电流同样保持不变。当负载减小时, 根据

改进下垂控制原理, 系统频率和电压稍微升高, 但可迅速恢复至额定值; DG 输出电流减小, 维持功率平衡。

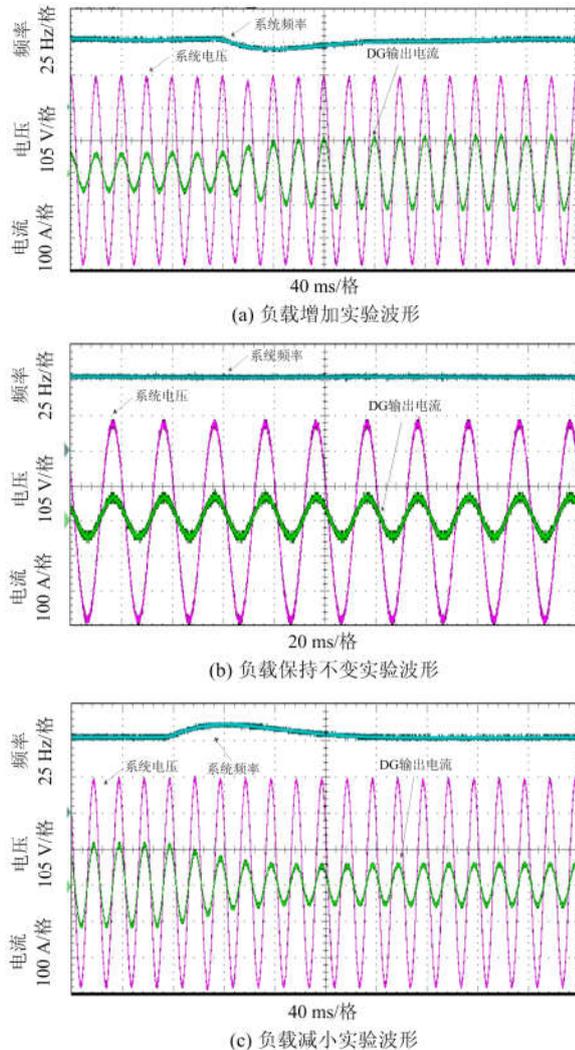


图 17 实验波形

Fig. 17 Experimental waveform

综上所述, 微网采用分段动态自适应下垂控制策略, 既具有较快的动态响应速度, 又具有良好的功率分配效果, 并可始终维持频率和电压稳定。

4 结论

本文针对传统下垂控制策略的不足, 提出了改进下垂控制策略。在 Matlab/Simulink 中搭建了仿真模型, 全面比较了传统下垂控制、分段下垂控制、动态下垂控制、自适应下垂控制以及分段动态自适应下垂控制 5 种改进下垂控制方法。仿真结果表明, 采用分段动态自适应下垂控制效果最好, 可有效加快系统响应速度, 减小系统环流, 维持频率和电压

稳定。基于 RT-LAB 半实物实时平台进行了实验, 实验结果验证了该控制策略的有效性和优越性。

参考文献

- [1] 王成山, 王守相. 分布式发电供电系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 1-4.
WANG Chengshan, WANG Shouxiang. Study on some key problems related to distributed generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 1-4.
- [2] 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): 1-12.
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.
- [3] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14.
WANG Chengshan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14.
- [4] 叶鹏, 李山, 何淼, 等. 风储孤网系统运行与控制研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 163-170.
YE Peng, LI Shan, HE Miao, et al. Summary of research on operation and control of wind storage isolated network system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 163-170.
- [5] 杨海柱, 徐锦举. 微电网并网逆变器的改进下垂控制策略研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(5): 36-40.
YANG Haizhu, XU Jinju. Research of improved droop control strategy for grid-connected inverters in microgrids[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(5): 36-40.
- [6] 颜湘武, 王星海, 王月茹. 一种基于拉格朗日插值的微网虚拟功率下垂控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 9-15.
YAN Xiangwu, WANG Xinghai, WANG Yueru. A virtual power droop control method for microgrid based on Lagrange interpolation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 9-15.
- [7] 唐昆明, 王俊杰, 张太勤. 基于自适应下垂控制的微电网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 68-74.
TANG Kunming, WANG Junjie, ZHANG Taiqin. Research on control strategy of microgrid based on adaptive droop control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 68-74.
- [8] 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, 2016, 44(1): 96-102.
MAI Qianping, CHEN Ming. Virtual impedance sag control for low voltage microgrid with multiple micro sources[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 96-102.
- [9] 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. Low voltage microgrid droop control strategy based on dynamic virtual impedance[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 1-6.
- [10] 陈丽娟, 王致杰. 基于改进下垂控制的微电网运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 16-21.
CHEN Lijuan, WANG Zhijie. Research on microgrid operation control strategy based on improved droop control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 16-21.
- [11] 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 inverter based on improved droop control[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 103-107.
- [12] 颜湘武, 王星海, 王月茹. 微电网的新型无差调频控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 1-6.
YAN Xiangwu, WANG Xinghai, WANG Yueru. Study of a new frequency control method for microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 1-6.
- [13] 徐进, 金逸, 胡从川, 等. 适用于海上风电并网的多端柔性直流系统自适应下垂控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 78-85.
XU Jin, JIN Yi, HU Congchuan, et al. Adaptive droop control strategy for multi terminal flexible DC systems for offshore wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 78-85.
- [14] 王琛, 孟建辉, 王毅, 等. 含多种分布式电源的直流微电网硬件在环仿真系统设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 146-154.
WANG Chen, MENG Jianhui, WANG Yi, et al. Design and implementation of hardware in loop simulation system for DC microgrid with multiple distributed power sources[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 146-154.
- [15] 麻常辉, 潘志远, 刘超男, 等. 基于自适应下垂控制的风光储微网调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 21-27.
MA Changhui, PAN Zhiyuan, LIU Chaonan, et al. Frequency study of wind storage microgrid based on adaptive droop control[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 21-27.
- [16] 张中锋. 微网逆变器的下垂控制策略研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
ZHANG Zhongfeng. Research on droop control strategy of microgrid inverter[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [17] 王成山, 高菲, 李鹏, 等. 低压微网控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 2-8.
WANG Chengshan, GAO Fei, LI Peng, et al. Control strategy research on low voltage microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 2-8.
- [18] 张东, 卓放. 基于下垂系数步长自适应的下垂控制策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 20-25.
ZHANG Dong, ZHUO Fang. Purpose droop control strategy based on dropping coefficient step size[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(24): 20-25.
- [19] GUERRERO J M, DE VICUNA L G, MATAS J, et al. A wireless controller to enhance dynamic performance of parallel inverters in distributed generation system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1205-1213.
- [20] LI Han, ESEYE A T, ZHANG Jianhua, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewable[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 122-135. DOI: 10.1186/s41601-017-0040-6.

收稿日期: 2018-05-09; 修回日期: 2018-05-30

作者简介:

杨海柱(1975—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子与电气传动; E-mail: 35948436@qq.com

岳刚伟(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与新能源; E-mail: 582215709@qq.com

康乐(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与新能源。E-mail: 728561924@qq.com

(编辑 许威)