

10-14-2020

## Adaptive Control Method of High Proportion Distributed Generation Connected to Distribution Network

Weijie Dong

1. *Beijing Information Science and Technology University Beijing 100192, China; ;*

Keyan Liu

2. *China Electric Power Research Institute Co. , Ltd. , Beijing 100192, China;*

Yilong Wang

1. *Beijing Information Science and Technology University Beijing 100192, China; ;*

Xiaozhong Li

1. *Beijing Information Science and Technology University Beijing 100192, China; ;*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Adaptive Control Method of High Proportion Distributed Generation Connected to Distribution Network

## Abstract

**Abstract:** Focus on the instability of the reactive power output precision caused by the voltage drop and loss of DG lines being switched to grid and the low output frequency and voltage caused by power deficiency of DG islanding, an improved droop control strategy is proposed to ensure the running stability of Active Distribution Network during DG connecting to network. *The DG model applies the feedback regulation of  $f-U$  droop output power and voltage drop compensator. The control system is applied to the quasi-synchronization grid-connected model, island mode and the modes switching process of an active distribution network's domain transient response.* The simulation results show the feasibility of the improved droop control strategy and verify the effective control method to achieve the voltage and frequency stability of the active and reactive power, and can provide a theoretical basis of the active protection and control of the distribution network.

## Keywords

low voltage distribution network, the switch to grid and island mode, droop control, transient

## Authors

Weijie Dong, Keyan Liu, Yilong Wang, Xiaozhong Li, and Yang Hao

## Recommended Citation

Dong Weijie, Liu Keyan, Wang Yilong, Li Xiaozhong, Yang Hao. Adaptive Control Method of High Proportion Distributed Generation Connected to Distribution Network[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(10): 2052-2058.

## 高比例分布式发电接入配电网自适应控制方法

董伟杰<sup>1</sup>, 刘科研<sup>2</sup>, 王义龙<sup>1</sup>, 李孝忠<sup>1</sup>, 杨浩<sup>1</sup>

(1. 北京信息科技大学, 北京 100192; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

**摘要:** 针对因分布式电源(DG, Distributed Generation)并网时线路存在压降损耗造成的无功功率输出精度不稳, 以及因 DG 孤岛下发生功率缺额时造成 DG 出口电压和频率均出现大幅下降的问题, 提出了一种改进下垂控制策略, 解决了 DG 接入配网运行稳定性问题。在 DG 模型增加下垂输出功率的  $f-U$  反馈调节和压降补偿环节, 将该控制系统应用于有源配电网的准同期并网模式、孤岛模式及两种模式的切换动态时域暂态响应过程, 仿真结果表明了改进下垂控制策略的可行性, 验证了该方法能实现电压频率的稳定和有功无功的有效控制, 可以为有源配电网的稳定运行控制提供理论基础。

**关键词:** 低压配电网; 并离网切换模式; 下垂控制; 暂态过程

中图分类号: TM615

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2020) 10-2052-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-FZ0412

## Adaptive Control Method of High Proportion Distributed Generation Connected to Distribution Network

Dong Weijie<sup>1</sup>, Liu Keyan<sup>2</sup>, Wang Yilong<sup>1</sup>, Li Xiaozhong<sup>1</sup>, Yang Hao<sup>1</sup>

(1. Beijing Information Science and Technology University Beijing 100192, China;

2. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

**Abstract:** Focus on the instability of the reactive power output precision caused by the voltage drop and loss of DG lines being switched to grid and the low output frequency and voltage caused by power deficiency of DG islanding, an improved droop control strategy is proposed to ensure the running stability of Active Distribution Network during DG connecting to network. *The DG model applies the feedback regulation of  $f-U$  droop output power and voltage drop compensator. The control system is applied to the quasi-synchronization grid-connected model, island mode and the modes switching process of an active distribution network's domain transient response.* The simulation results show the feasibility of the improved droop control strategy and verify the effective control method to achieve the voltage and frequency stability of the active and reactive power, and can provide a theoretical basis of the active protection and control of the distribution network.

**Keywords:** low voltage distribution network; the switch to grid and island mode; droop control; transient

## 引言

DG(Distributed Generation)和储能设备高比例



收稿日期: 2020-03-30 修回日期: 2020-06-27;  
基金项目: 北京信息科技大学学校科研基金(2025005);  
作者简介: 董伟杰(1982-), 男, 河北, 博士, 讲师,  
研究方向为有源配电网, 分布式电源与微网, 虚拟同步  
控制技术; 刘科研(1979-), 男, 河南, 博士, 高工,  
研究方向为配电网运行分析、智能有源配电网、  
故障诊断与大数据分析。

高渗透率接入已成为配电网的发展趋势, 其对于潮流分布、故障特性、电能质量、保护方案、运行调度都产生了较大影响。传统上针对配电网的频率控制大都被忽略, 但当大量 DG 应用到配电网后, 不同种类及运行特性的 DG、变频器、电力电子设备的引入使得配电系统的频率特性日趋明显, 针对这些特性的研究和分析, 对有源配电网内电力电子相

<http://www.china-simulation.com>

• 2052 •

关设备的控制系统设计、入网分析、故障识别与保护等具有技术支撑作用, 具有一定的现实意义。

分布式发电系统的控制方式主要分为并网式和离网式<sup>[1]</sup>, 离网控制方式主要采用下垂控制策略。下垂控制的原理一般为有功-频率下垂控制, 当线路的负载超过额定容量时, 频率会下降, 此时增加有功功率, 会将频率点拉回正常值, 反之则减少有功输出<sup>[2-3]</sup>, 另外也有的采用有功相角下垂控制<sup>[4-5]</sup>, 按照特定比例分配有功功率, 但相角有功之间的关系理论支撑较弱, 对应关系难以确定。线路在低压配网主要呈阻性, 对下垂控制策略产生一定的影响, 需要进行适当地改进。下垂控制策略配合智能的优化调度和治理算法<sup>[6]</sup>, 分布式电源可以有效改善所接入低压配电网的电压质量。文献[7]在传统的下垂控制中加入无功-电压比例系数, 来改善线路的电压特性和有功的分配, 但是仿真证明该方案稳定性较差。文献[8]通过控制适当调整控制策略改变分布式电源的等效输出电感, 并对有功和无功采用独立解耦控制。低压配电网线路的呈现较强阻性, 使得无论有功还是无功, 均产生阻性消耗, 不能实现各自独立控制, 影响分布式电源的控制特性, 可以通过控制策略的调整改变该种状态, 改善下垂控制的性能, 理论原理为阻抗匹配抵消的方法, 并取得一定的仿真验证效果<sup>[9]</sup>。下垂控制可使系统获得更为有效的附加电量支持, 提高系统的暂态电压恢复能力, 可以提高系统的稳定控制能力<sup>[10]</sup>, 也可以进一步增加频率偏差补偿环节进一步增强系统的暂态稳定调节能力<sup>[11]</sup>。

本文通过 Matlab/Simulink 搭建基于改进的下垂控制分布式发电网络, 进一步完善了控制策略。以此为基础考虑 DG 接入低压配网暂态过程变化, 对 DG 并网、准同期并网进行较为全面仿真, 以验证仿真模型的正确性和控制策略的有效性, 可以为有源配电网稳定运行与控制分析研究提供理论基础。

## 1 DG 并网逆变器电气系统建模

分布式发电系统主要由直流侧恒压源、DC/AC 逆变器、LC 滤波电路、隔离变压器组成。当并网系统中的线路比较短时, 可忽略线路的影响和隔离变压器的作用即逆变器输出电压经 LC 滤波电路滤波后直接连至交流网络。该种并网方式下, 列写电路方程可得:

$$\begin{cases} L \frac{di_{ld}}{dt} = u_{ld} - u_d - \omega Li_{lq} \\ L \frac{di_{lq}}{dt} = u_{lq} - u_q + \omega Li_{ld} \\ C \frac{du_d}{dt} = i_{ld} - i_d - \omega Cu_q \\ C \frac{du_q}{dt} = i_{lq} - i_q + \omega Lu_d \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $L$  为滤波器单相电感;  $C$  为“星角变换”后滤波器的单相电容, 具体数值可由变换公式求得;  $i_{la}$ ,  $i_{lb}$ ,  $i_{lc}$ ,  $i_{ld}$ ,  $i_{lq}$  分别为逆变器输出相电流,  $i_{ld}$ ,  $i_{lq}$  经过 Park 变换后的 d 轴和 q 轴分量;  $i_{ld}$ ,  $i_{lq}$  分别为  $i_{la}$ ,  $i_{lb}$ ,  $i_{lc}$  经过 Park 变换后的 d 轴和 q 轴分量。

电路方程约束条件:

- (1) 电感适中在容量和压降之间平衡;
- (2) 电容尽量滤掉高频信号;
- (3) 滤波电路为窄带通滤波, 且谐振特性避开由于调制波产生高频谐振点和低频功率的振荡点。

该数学模型是列写并网电路状态变量方程式后经过 Park 变换所得的逆变器并网电路方程式, 是各类反馈控制器设计的理论基础。可以看出, 因为存在感性容性元件, 此时的 dq 分量存在耦合关系, 控制策略的设计首先就是要去除电压电流的耦合关系, 实现 dq 分量分别精细控制, 最后使得逆变器的输出满足较高的电能质量要求, 比如总谐波失真 THD 很小、功率因数为 1, 输出电压与电网电压同频同相。

## 2 DG 并网逆变器控制系统建模

DG 并网需要通过设计下垂控制器来控制逆变器的开断状态实现 DC/AC 转换, 完成 DG 准同

期并网和故障后离网操作。控制系统总体设计如图 1 所示。

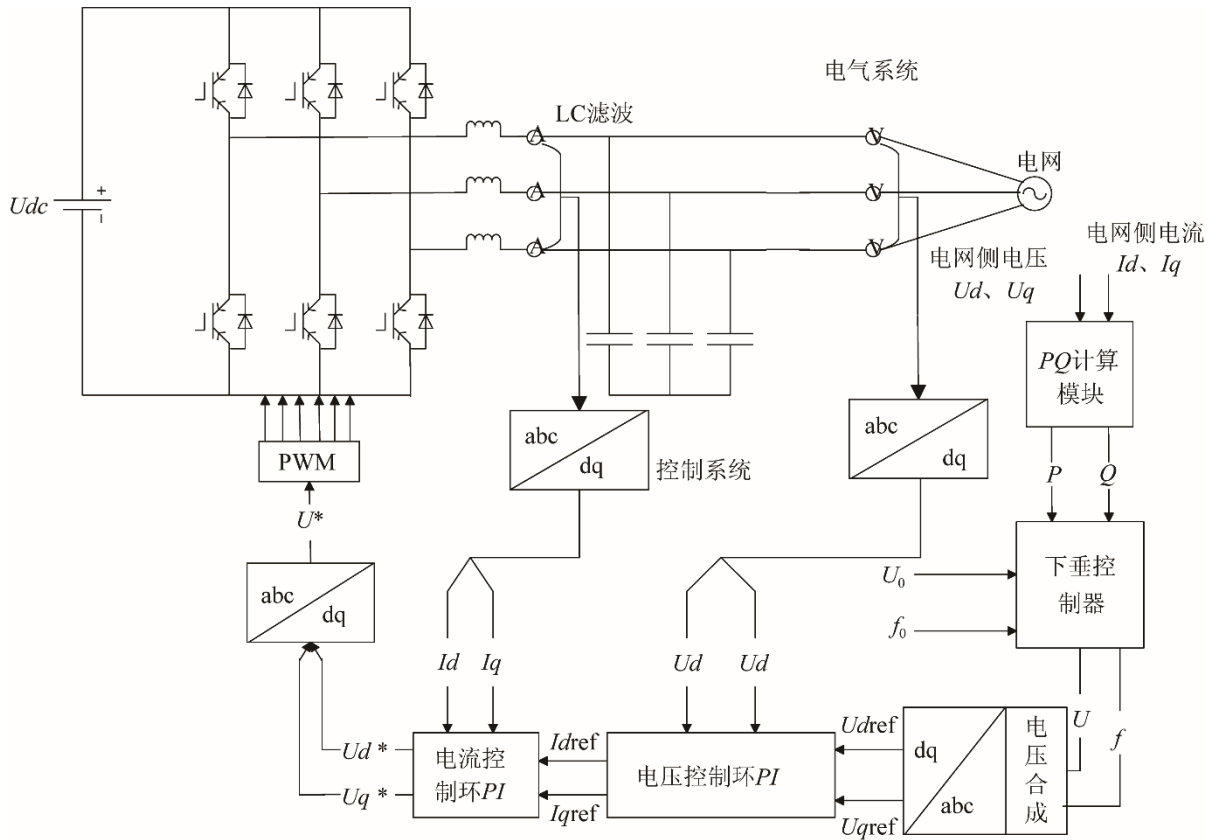


图 1 DG 控制系统总拓扑图  
Fig. 1 General topology of DG control system

在总拓扑图中, 主要包含如下过程: (1) 测量 DG 输出端口的电压和电流; (2) 计算 DG 输出的有功功率、无功功率以及频率参数; (3) 以 DG 的额定功率为参考, 通过下垂控制策略得出 DG 逆变器输出的电压、电流和相位参考指令; (4) 逆变器输出 PWM 调制并经滤波环节, 输出所需要的有功功率和无功功率。

### 2.1 改进的下垂控制器设计

传统下垂控制策略主要理论依据为同步发电机的调频环节。对于输电线路呈现较明显感性的系统, 当系统有功功率大于负荷所需时, 利用下垂特性增大其输出频率, 从而减小其输出的有功

功率; 当系统有功功率不满足负荷所需时, 则利用下垂特性减小其输出频率, 从而增大其输出的有功功率。同理可得其反向调节机制。通过这样反复调节, 使系统达到最小环流点。给出有功功率  $P$  和频率  $f$  以及无功功率  $Q$  与电压  $U$  的 Droop 关系为:

$$\begin{aligned} f &= f_0 + (P_0 - P)K_P \\ U &= U_0 + (Q_0 - Q)K_Q \end{aligned} \quad (2)$$

公式(2)传统的下垂控制里两个下垂系数均保持不变, 当 DG 离网时可能存在较大的功率变动, DG 需要发出或者吸收较大的有功功率或者无功功率, 且 DG 发出的频率和电压会大幅下降,

引起低压配网运行不稳定。低压配网线路阻抗比值比较大, 线路电阻  $R$  不可忽略, 有功功率与无功功率存在强耦合关系, 虽然可以通过设计逆变器出口电抗参数, 使得线路呈感性, 这种方法需要花费大量额外费用。图 1 所示引入  $f$ - $U$  的 PI 调制环节加入下垂控制器, 以期减少 DG 输出电压频率波动。

另外, 低压配网线路存在一定损耗, 传输线路电压存在一定的压降, 因此在传统下垂控制里加入电压补偿量来补偿输电线路上的压降和损耗提高 DG 对无功负荷使用和分配的精度。基于对系统电压频率进行反馈微调节和输电线路损失的电压进行适当补偿, 本文提出一种改进型的功率补偿型下垂控制策略。改进下垂控制可表示为:

$$f - f^* = -m_p \left[ (p - p^*) + \frac{k_{pi}s + k_{if}}{s} (f - f^*) \right]$$

$$U - U^* = -n_q \left[ (Q - Q^*) + \frac{k_{pv}s + k_{iv}}{s} (U - U^*) + \frac{Q}{U} X \right]$$

通过调节系数  $m_p$ ,  $n_q$ ,  $k_{pi}$ ,  $k_{if}$ ,  $k_{pv}$ ,  $k_{iv}$  即可以对逆变器输出滤波环节造成的功率损失和相位偏移进行补偿, 对输电线路上的电压压降损耗进行前馈补偿, 提高系统的静态和动态稳定性。

## 2.2 电压电流双环控制器设计

本文采用电容电流作为电流内环的控制量, 电网电压作为电压外环的控制量。通过 Park 坐标变换实现功率解耦控制, 设计控制器所需电流控制的数学模型:

$$(I_{cd}^* - I_{cd})(k_{pcd} + \frac{k_{icd}}{s}) - I_{cq}L\omega + V_{id} = V_d$$

$$(I_{cq}^* - I_{cq})(k_{pcq} + \frac{k_{icq}}{s}) + I_{cd}L\omega + V_{iq} = V_q$$

式中:  $(k_{pcd} + k_{icd}/s)$  和  $(k_{pcq} + k_{icq}/s)$  分别为电流控制中 PI 控制的 dq 分量比例参数和积分参数表

示式;  $V_{id}$  和  $V_{iq}$  分别为逆变器桥式调制电压信号的 d 轴和 q 轴分量;  $I_{cd}$  和  $I_{cq}$  分别为电容电流的 d 轴和 q 轴分量。

电压控制的数学模型可以表示为:

$$(V_{id}^* - V_{id})(k_{pid} + \frac{k_{iud}}{s}) - V_{iq}^*C_f\omega + C_f \frac{dv_{id}^*}{dt} = I_{cd}^*$$

$$(V_{iq}^* - V_{iq})(k_{piq} + \frac{k_{iuq}}{s}) - V_{id}^*C_f\omega + C_f \frac{dv_{iq}^*}{dt} = I_{cq}^*$$

式中:  $V_{id}$ ,  $V_{iq}$ ,  $V_{id}^*$  和  $V_{iq}^*$  为电压指令值;  $I_{cd}^*$  和  $I_{cq}^*$  分别为电容电流参考值的 dq 轴分量;  $C_f dv_{id}^*/dt$  和  $C_f dv_{iq}^*/dt$  逆变器输出电流值等效值。

## 3 仿真结果及分析

利用 Matlab/Simulink 搭建基于改进下垂控制的 DG 模型。如图 2 所示, 采用欧盟低压配网的算例, 对 DG 进行随机并网。

DG 接入点频率变化如图 3(a)所示。在 0.4 s 内接入点频率启动后从工频下降到 49.5 Hz, 其中在  $t=0.1$  s 时, 依据下垂特性调节作用, 频率由 49.5 Hz 反弹逐渐上升至 50.15 Hz, 最终稳定于工频。

电压变化如图 3(b)所示, 采用有效值可以更明显看出电压变化的趋势。启动后 0.05 s 内并网点电压从 0 V 急剧增加到 300 V, 达到峰值后开始下降至 220 V, 最后逐渐趋于稳定。

有功功率变化如图 3(c)所示。启动后 0.05 s 内并网点电压从 0 kW 先小幅下跌然后急剧增加到 520 kW, 达到峰值后开始下降至 -90 kW, 中间的变化过程表明功率的流向是变化的, 最后趋于稳定至 5 kW 的 DG 额定输出功率。无功功率变化如图 3(d)所示。无功功率变化与有功相反, DG 启动后向电网输送大量瞬间无功功率, 达到 -480 kW 时开始触底反弹, 随后上升至峰值 100 kW, 最后小幅下降稳定至 -20 kW。

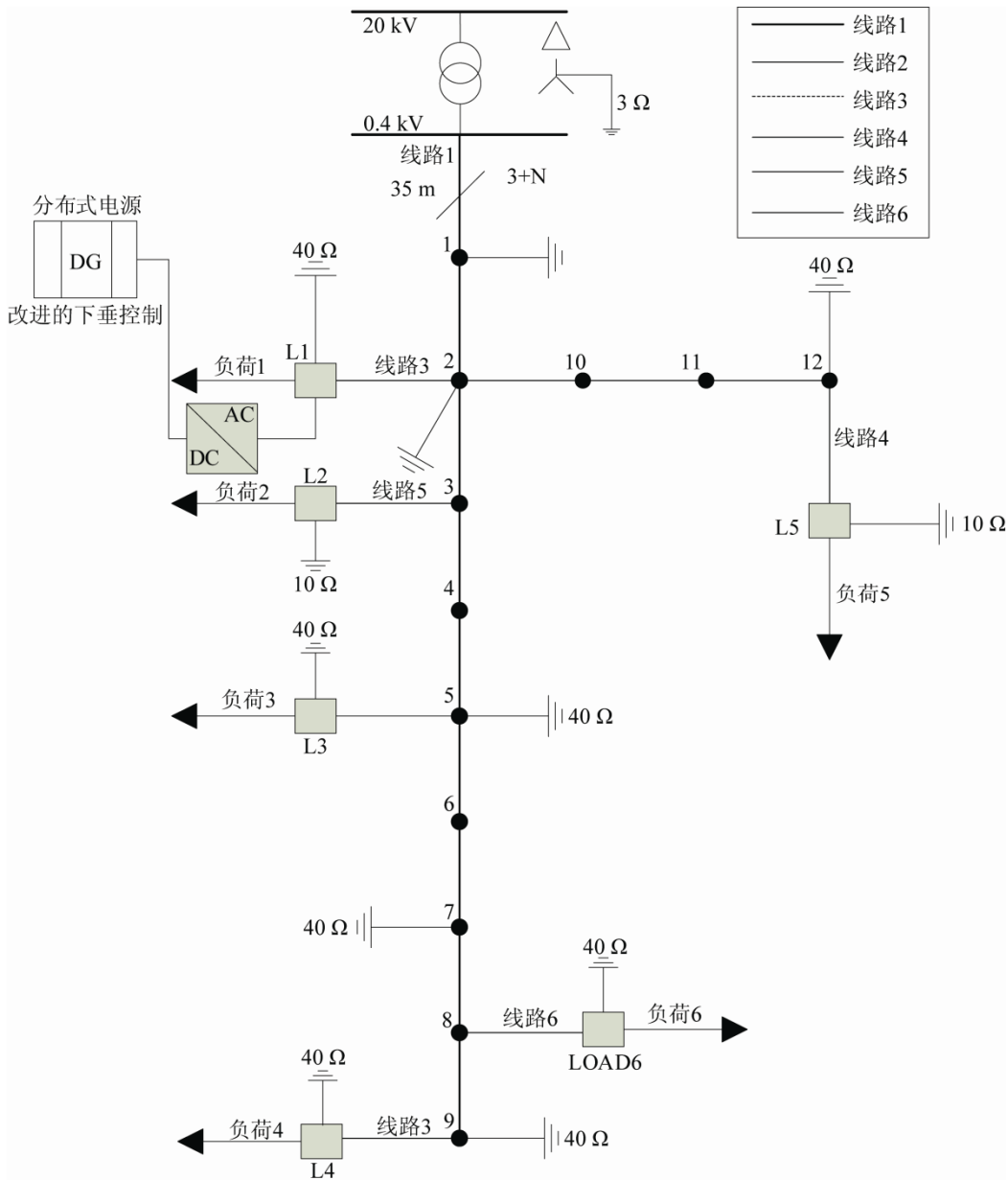
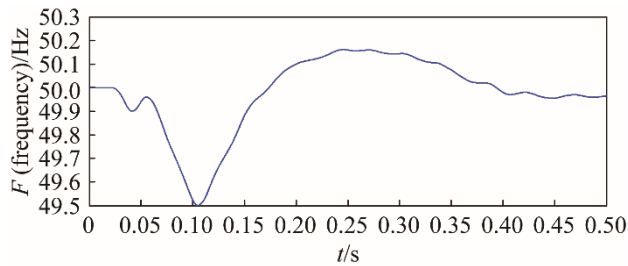


图 2 欧盟低压配网结构示意图

Fig. 2 EU low voltage distribution network structure diagram



(a) 接入点频率

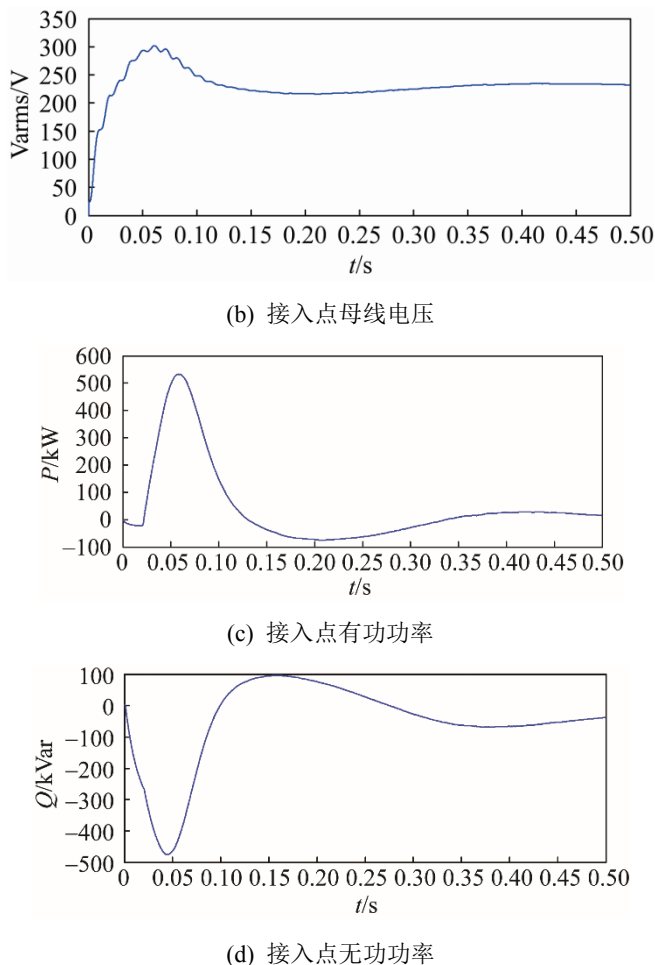


图 3 DG 并网过程仿真结果

Fig. 3 Simulation results of DG grid connection process

## 4 结论

本文针对 DG 并网时线路存在压降损耗造成的无功功率输出精度不稳问题与因 DG 孤岛时存在有功功率缺额造成的 DG 出口频率和电压均出现大幅下降问题, 提出了一种改进下垂控制策略。在 DG 模型增加下垂输出功率的  $f-U$  反馈调节和压降补偿环节, 将该控制系统应用于有源配电网的准同期并网模式、孤岛模式及两种模式的切换动态时域暂态响应过程, 采用欧盟经典仿真模型结果表明了改进下垂控制策略的可行性, 验证了该方法能实现电压频率的稳定和有功无功的有效控制, 可以为有源配电网的稳定运行控制提供理论基础。

## 参考文献:

- [1] 姜玉霞, 田艳军, 李永刚. 有功功率载荷波动对分布式发电并网逆变器稳定影响分析及其改进控制策略[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 646-654.  
Jiang Yuxia, Tian Yanjun, Li Yonggang. Analysis of the influence of active power load fluctuation on the stability of distributed generation grid connected inverter and its improved control strategy[J]. Power Grid Technology, 2020, 44(2): 646-654.
- [2] 刘长良, 王鹏飞, 刘帅, 等. 一种改进的 CS 算法及其在微电网优化中的应用[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(3): 930-936.  
Liu Changliang, Wang Pengfei, Liu Shuai, et al. An improved CS algorithm and its application in microgrid optimization[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(3): 930-936.
- [3] Borrega M, Marroyo L, Gonzalez R, et al. Modeling and control of a master-slave PV inverter with N-paralleled



- in-verters and three-phase three-limb inductors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics (S0885-8993), 2013, 28(6): 2842-2855.
- [4] 周贤正, 荣飞, 吕志鹏, 等. 低压微电网采用坐标旋转的虚拟功率 V/f 下垂控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 47-51.  
Zhou Xianzheng, Rong Fei, Lü Zhipeng, et al. Virtual power V/F droop control strategy with coordinate rotation for low voltage microgrid[J]. Power System Automation, 2012, 36(2): 47-51.
- [5] Li B K, Liang Y S, Wang G, et al. A control strategy for soft open points based on adaptive voltage droop outer-loop control and sliding mode inner-loop control with feedback linearization[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems (S0142-0615), 2020, 122: 1-13.
- [6] Guilherme D O A, José L R P, João A P F. A new unbalanced three-phase governor power flow formulation based on the current injections method[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems (S0142-0615), 2020, 123: 1-12.
- [7] Pedro P V, Mauricio S, Tam T M, et al. A comprehensive assessment of PV inverters operating with droop control for overvoltage mitigation in LV distribution networks[J]. Renewable Energy (S0960-1481), 2020, 159: 172-183.
- [8] 于国星, 宋蕙慧, 侯睿, 等. 柔性直流互联孤岛微电网群的分布式频率协同控制[J/OL]. 电力系统自动化: 1-15. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=DLXT2020061500D&v=F4nMUvjTbAv6%25mmd2BovlbjRTr4ahhY1BG26z6y3mdL3%25mmd2BREJXkM9E8zZW9BgvGplSWwz3>.  
Yu Guoxing, Song Huihui, Hou Rui, et al. Distributed frequency cooperative control of micro grid group with flexible DC interconnection[J/OL]. Power System Automation: 1-15. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=DLXT2020061500D&v=F4nMUvjTbAv6%25mmd2BovlbjRTr4ahhY1BG26z6y3mdL3%25mmd2BREJXkM9E8zZW9BgvGplSWwz3>.
- [9] 吴青峰, 智泽英, 赵志诚, 等. 孤岛微电网不同尺寸 DESUs 的 SoC 均衡方案[J/OL]. 电测与仪表: 1-7. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=DCYQ20200608001&v=hy3CJkzDUKSzz3ucgSW2LH165HA7V9ads0kc uL5QA%25mmd2FbjxXVcnjTB0a9qcvn6pZrT>.  
Wu Qingfeng, Zhi Zeying, Zhao Zhicheng, et al. SOC equalization scheme of desus with different sizes in Gudao microgrid[J/OL]. Electrical Measurement and Instrumentation: 1-7. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=DCYQ20200608001&v=hy3CJkzDUKSzz3ucgSW2LH165HA7V9ads0kc uL5QA%25mmd2FbjxXVcnjTB0a9qcvn6pZrT>.
- [10] 付媛, 江国文, 张祥宇, 等. 柔性直流电网的暂态稳定判据与电压恢复控制技术[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1710-1718.  
Fu Yuan, Jiang Guowen, Zhang Xiangyu, et al. Transient stability criterion and voltage recovery control technology of flexible DC power grid[J]. High Voltage Technology, 2020, 46(5): 1710-1718.
- [11] 梁荣伟, 吕智林. 基于频率偏差积分补偿的 VSG 控制策略[J]. 电力电子技术, 2020, 54(5): 50-55.  
Liang Rongwei, Lü Zhilin. VSG control strategy based on frequency deviation integral compensation[J]. Power Electronics Technology, 2020, 54(5): 50-55.