

低压微网控制策略研究

王成山, 高菲, 李鹏, 黄碧斌, 丁承第, 于浩

(智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津市 南开区 300072)

Control Strategy Research on Low Voltage Microgrid

WANG Chengshan, GAO Fei, LI Peng, HUANG Bibin, DING Chengdi, YU Hao

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Nankai District, Tianjin 300072, China)

ABSTRACT: In order to avoid the switch of control strategies and achieve the smooth transition when operating modes change, the typical droop control based on $P-f$ and $Q-V$ characteristics was improved in this paper. And the parameter automatic adjustment was applied to reduce the voltage fluctuation caused by the power mismatch in the microgrid. At the same time, the method of grid synchronization control based on the positive feedback was analyzed to achieve microgrid reconnection to the power network while maintaining the output power of distribution generators (DGs). The simulation results of low voltage microgrid show that the proposed control methods speed up the voltage control when islanding occurs, complete the smooth reconnection of the microgrid and reduce the impact on the microgrid when operating mode changes.

KEY WORDS: improved droop control; parameter adjustment; reference positive feedback; grid synchronization control; low voltage microgrid

摘要: 为了避免微网运行模式变化时控制策略的切换, 实现微网的平滑过渡, 对传统的 $P-f$ 和 $Q-V$ 下垂控制进行改进, 实现了并网运行时基于下垂控制的间接恒功率控制方式。并在脱网过程中采用了控制参数自动调节机制, 以减小微网大功率不匹配引起的电压波动。分析了基于频率和幅值参考值正反馈的同步并网控制原理, 在维持分布式电源输出功率的前提下利用下垂控制完成微网的同步并网。低压微网仿真结果表明, 提出的控制方法能够有效地加快脱网过程中的电压调节速度, 实现孤岛运行微网的平滑并网, 降低运行模式变化给微网带来的冲击。

关键词: 改进下垂控制; 参数自动调节; 参考值正反馈; 同步并网控制; 低压微网

0 引言

近年来, 分布式发电技术以其能源利用率高、污染小、可靠性高等特点受到了广泛关注, 其中分布式发电技术可充分利用多种可再生能源, 为人类日益严重的能源和环境危机带来了曙光。近年来在各国政府支持下, 分布式发电技术发展迅速, 目前较为成熟的分布式发电技术包括光伏发电、燃料电池发电、微型燃气轮机发电、风力发电等。分布式电源并网方式可分为交流旋转电机直接并网和通过电力电子换流装置并网 2 种, 后者在系统的电压、频率以及功率调节方面更加灵活。随着分布式发电技术的发展, 多种分布式电源、储能装置、负荷及控制装置组合成独立的供电系统, 以微网的形式接入大电网, 利用控制的灵活性可实现其对大电网供电能力和电能质量的支撑作用^[1]。

在并网模式和孤岛模式下, 微网要求对各分布式电源进行协调控制, 以保证高效的潮流调节和电压稳定能力; 为了进一步体现微网对大电网的支撑作用, 要求协调控制同样具有模式切换功能, 保证在失去外部供电后, 微网对本地重要负荷的持续供电。国内外学者对微网控制和模式转换均做过多方面研究工作: 文献[2-4]在并网和孤岛运行模式转换时进行了控制策略的切换, 增大了控制器在切换过程中平滑过渡的难度, 容易产生较大冲击; 文献[5]提出了孤岛运行时一种基于下垂控制的无差 $V-f$ 控制, 但是这种控制只能应用于一个主控分布式电源, 不利于实现孤岛时各分布式电源功率的合理分配; 文献[6]在并网和孤岛运行时外环利用 $f-P$ 和 $V-Q$ 下垂控制方法, 内环采用有功功率和无功功率分别来调节逆变器输出电流的 d 轴和 q 轴分量, 这种控制更适合于电流源逆变器, 而实际应用中的并

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 计划)(2009CB219700, 2010CB234600); 国家自然科学基金项目(50837001)。
Project Supported by National Basic Research Program (973 Program)(2009CB219700, 2010CB234600); Project Supported by National Nature Science Foundation of China (50837001).

网装置更多为电压源逆变器；文献[7]提出了 P - f (Q - V)和 f - P (V - Q)相结合的控制方式，但其动态过程中产生较大的功率振荡；文献[8-9]在并网和孤岛运行时外环利用 P - f 和 Q - V 下垂控制方法，但是没有考虑孤岛转并网时利用下垂控制的同步并网问题；文献[10]简要介绍了同步并网控制，但是其内环控制较为复杂，参数设计受系统影响较大。

本文基于 P - f 和 Q - V 下垂控制策略，提出了无功功率控制环节的改进方法，实现了并网运行时基于下垂控制的恒功率控制，并提出了一种并网转孤岛运行时控制参数的调节方法，以减小脱网过程对微网系统的冲击。在孤岛转并网过程中通过利用公共连接点(point of common coupling, PCC)信息对下垂控制进行反馈调节，实现了微网和大电网的同步并网，真正实现并网和孤岛运行相互转换的平滑过渡。最后在低压微网系统上对所提出的控制策略进行了仿真验证，证明了文中所提方法的适用性。

1 下垂控制策略

1.1 下垂控制原理

传统的下垂控制原理是在线路感抗远大于电阻的前提下，利用发电机端电压的频率和幅值与传输的有功功率和无功功率之间的关系进行二次调频和无功调节。目前，这种方法也被应用在微网中的并联逆变器控制中。下垂控制是一种典型的对等控制方法，适用于微网中多个并联逆变器之间的能量管理，分布式电源之间不需要通信联系就能实现合理的负荷分担。当线路感抗远大于电阻，且逆变器出口电压和并联交流母线电压相位相差较小时，输出功率满足下垂控制所需的 P - f 和 Q - V 解耦，可得如式(1)所示的下垂特性。

$$\begin{cases} f = f_0 - m(P - P_0) \\ U = U_0 - n(Q - Q_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中： f 和 U 分别为下垂特性计算后的频率和电压， P 和 Q 为输出有功功率和无功功率，相应带下标的变量为下垂控制参考值； m 和 n 分别为有功功率和无功功率的下垂系数。

在低压微网系统中，由于低压线路一般呈现阻性，文献[11]通过对逆变器闭环控制器参数的合理设计，使得逆变器输出阻抗为感性，从而证明了 P - f 和 Q - V 解耦特性在低压微网系统中同样适用。下文将通过逆变器端口输出阻抗频率响应验证所使用的 P - f 和 Q - V 解耦控制的合理性。

1.2 微网控制策略

1.2.1 并网运行模式下的控制策略

在并网运行时，认为外部电网的频率为恒定的工频 50Hz，如将频率参考值设为工频，则在式(1)中，即满足 $f=f_0=50$ Hz，因此必然存在 $P=P_0$ ，间接实现了利用下垂控制的有功功率控制。而在辐射状的低压微网中，由于线路上电压的降落，在采用 Q - V 下垂控制时，如果电压参考值仍然选取额定值，则会引起无功功率的较大偏差。考虑到功率解耦关系，可以推导出电压幅值随无功功率变化的函数关系，即

$$U = \frac{E + \sqrt{E^2 - 4QX}}{2} \quad (2)$$

在设定并网点处电压 E 和逆变器到并网点处感抗 X 为定值后，可以得到逆变器出口电压幅值 U 随输出无功功率 Q 变化的微网运行特性曲线，如图 1 所示。

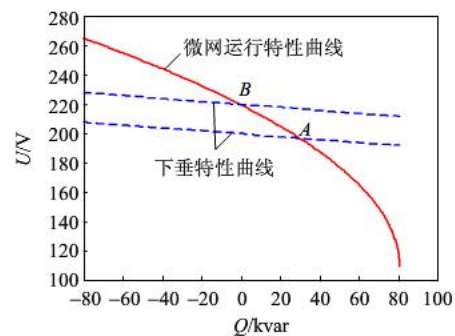


图 1 Q - V 下垂控制框图

Fig. 1 Droop control diagram of Q - V

可以看出，给定 Q - V 下垂特性曲线合理的下垂系数，存在唯一的稳定运行点。假设初始时系统运行在 A 点，增加下垂特性曲线的电压参考值，则曲线在平面中上移，最终稳定在 B 点，反之亦然。根据这个原理，本文在原有的 Q - V 下垂控制基础上，增加了外环无功功率控制环节，作为电压参考值的正反馈项，即

$$U_0 = U'_0 + (K_{pi} + \frac{K_{il}}{s})(Q_{ref} - Q) \quad (3)$$

式中： U_0 和 U'_0 分别为无功功率 PI 调节后叠加生成的实际电压参考值和额定电压参考值； Q_{ref} 为输出无功功率参考值； K_{pi} 和 K_{il} 分别为无功功率 PI 控制的比例参数和积分参数。

最终利用下垂控制电压参考值的自适应调整间接实现无功功率控制，具体控制结构如图 2 所示。

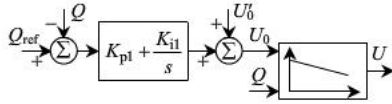


图2 Q-V下垂控制框图

Fig. 2 Droop control diagram of Q-V

采用改进的 $Q-V$ 下垂控制策略最终形成了三环控制系统结构, 最外环是无功功率控制环节, 中间是 $P-f$ 和 $Q-V$ 下垂计算环节, 最后是采用逆变器端口电压幅值 PI 调节的控制内环^[12]。三环控制系统结构实现了低压微网并网运行时基于下垂控制的间接功率控制。整体控制框图如图 3 所示。

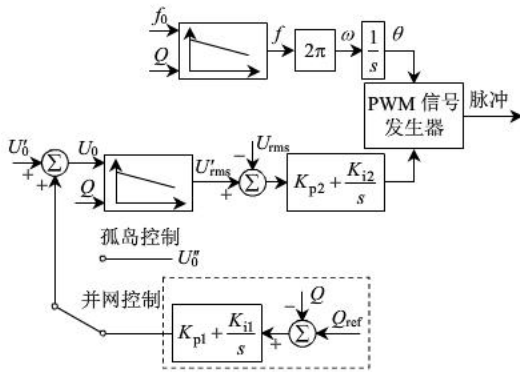


图3 改进的下垂控制框图

Fig. 3 Improved droop control diagram

1.2.2 孤岛运行模式的控制策略

孤岛运行时, 微网系统的频率和电压需要根据下垂特性动态调节, 最终过渡到一个新的稳态, 通过多个分布式电源共同分担本地负荷。在这个过程

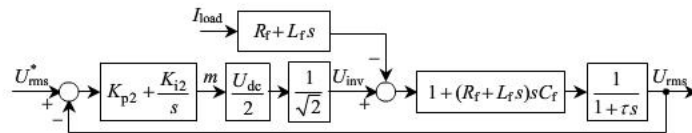


图4 电压环控制结构图

Fig. 4 Voltage control loop

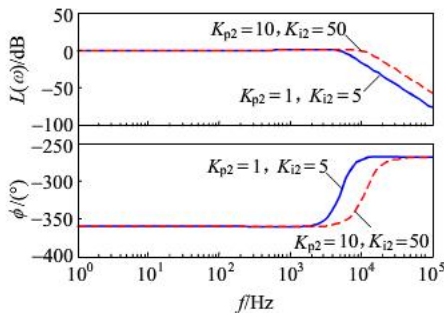


图5 电压闭环频率响应

Fig. 5 Frequency response of voltage loop

$$\begin{cases}
 K_p(k) = \begin{cases} \alpha K_p(k-1), & |U_{rms} - U_e| > U_{th} \\ \beta K_p(k-1), & |U_{rms} - U_e| \leq U_{th} \end{cases} \\
 K_p(k) \geq K_{pmin}
 \end{cases} \quad (4)$$

中, 所有分布式电源都参与了微网的频率和电压调节。与并网控制结构相比, 孤岛运行模式的控制结构需要去除外环的无功功率控制环节, 最终形成两环控制系统结构。

1.2.3 控制参数自动调节

本文下垂控制内环采用电压有效值内环, 能够快速有效地生成调制信号。与基于三相自然坐标系的电压电流内环控制^[10]和基于两相静止坐标系的电压电流内环控制^[13]相比, 电压有效值内环能够采用比例积分环节快速实现无差调节, 控制参数易于设计。图 4 给出了电压环控制框图, 其中: U_{dc} 为逆变器端口直流电压; R_f 、 L_f 和 C_f 为滤波器参数; τ 为电压有效值采样延迟时间。根据附录表 A1 给出的参数, 可以得到如图 5 所示的电压环频率响应曲线。

由频域响应曲线可知, 控制器参数 K_{p2} 和 K_{i2} 值越大, 电压环传递函数的带宽越宽, 电压环的动态响应越好, 但是 K_{p2} 和 K_{i2} 值太大可能会导致系统不稳定。因此为了使微网系统在稳态运行或是小扰动下保持较小的电压脉动, 要求电压控制器具有平缓的动态过程, 保证系统的稳定性。而在电网模式切换的剧烈动态过程中, 要求控制器具有较大的比例和积分参数, 从而使电压指令快速变化, 电压内环获得较好的动态性能。本文提出了通过对电压幅值进行判断, 增大和减小控制参数, 以同时保证动态和稳态调节效果, 其具体实现过程为

式中: $K_p(k)$ 和 $K_p(k-1)$ 为比例参数前后时步数值; α 和 β 为参数增益; U_e 和 U_{th} 分别为电压额定值和波动限值; K_{pmin} 为比例参数最小值。为了防止动态和稳态过渡过程的振荡, 参数增益分别取值为 1.05 和 0.95。电压额定值取 220 V, 波动限值为额定电压的 $\pm 5\%$ 。

根据图 4 所示电压环控制结构图, 得到图 6 所示输出电压和负荷电流的频率响应曲线。可以看出, 在工频附近, 逆变器输出阻抗相位为 90° , 即在稳态的控制参数下, 逆变器输出端口等效阻抗为感性, 验证了此时采用 $P-f$ 和 $Q-V$ 解耦下垂控制的合理性。

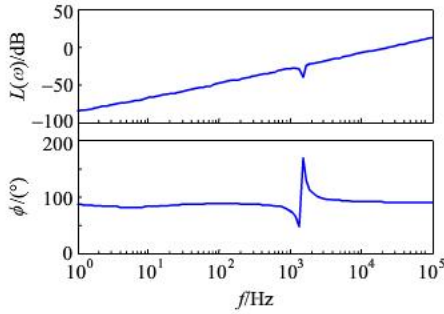


图 6 逆变器输出阻抗频率响应

Fig. 6 Frequency response of inverter output impedance

2 同步并网控制

同步并网控制是微网孤岛运行向并网运行过渡的重要前提。孤岛状态下微网的并网控制和传统发电机并网要求相同，都需要公共连接点两端电压的幅值、频率和相位完全一致。在不改变基本控制结构的基础上，利用公共连接点断路器两端电压幅值和相位差值作为反馈量进行 PI 调节，叠加得到新的频率和幅值参考项：

$$\begin{cases} f_0 = f'_0 + (K_{p3} + \frac{K_{i3}}{s})(\theta_{PCC_grid} - \theta_{PCC_microgrid}) \\ U_0 = U'_0 + (K_{p4} + \frac{K_{i4}}{s})(U_{PCC_grid} - U_{PCC_microgrid}) \end{cases} \quad (5)$$

式中： $f'_0(U'_0)$ 和 $f_0(U_0)$ 分别为传统的和通过叠加得到的频率和幅值参考项； θ_{PCC_grid} 、 U_{PCC_grid} 和 $\theta_{PCC_microgrid}$ 、 $U_{PCC_microgrid}$ 分别为大电网和微网在公共连接点处的电压相位、幅值。

进行孤岛微网系统运行点的移动，可以实现微网平滑的同步并网过程，具体控制框图如图 7 所示。下文将对适用于含多个下垂控制逆变器的微网进行同步并网控制的原理进行详细分析。

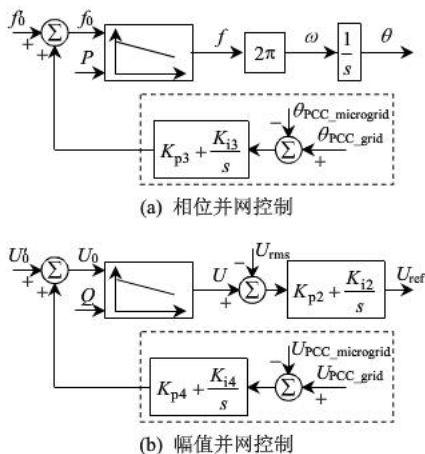
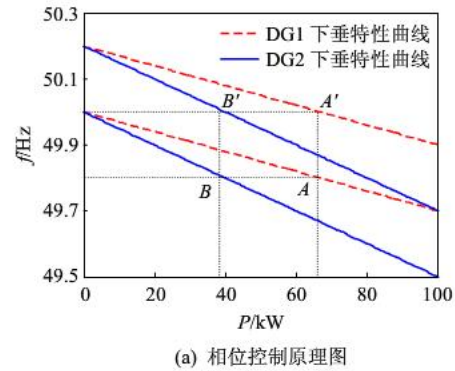


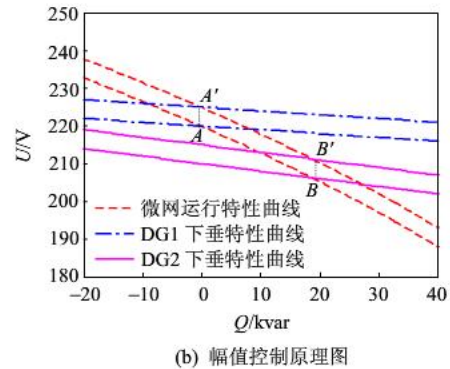
图 7 同步并网控制框图

Fig. 7 Grid synchronization control

图 8(a)说明了相位控制过程：初始时刻，2 个分布式电源 DG1 和 DG2 分别运行在 A、B 两点，微网的相位和频率均与外部电网存在一定误差；当进行重新并网操作时，利用此时微网和外部电网相位误差信息进行 PI 调节，并作为正反馈项，与原有下垂曲线的频率参考值 f_0 相加形成新的频率参考值 f'_0 ；最终 DG1 和 DG2 下垂特性曲线整体移动，微网与外部电网的频率和相位偏差消除，频率稳定在 50 Hz，DG1 和 DG2 获得新的运行点 A' 和 B'。同理，图 8(b)阐述了电压幅值控制过程。值得注意的是，在同步并网过程中，这种控制方式需要利用 PCC 点处的相位和幅值误差，DG1 和 DG2 的控制器需要进行上层通信。



(a) 相位控制原理图



(b) 幅值控制原理图

图 8 同步并网控制原理

Fig. 8 Principle of grid synchronization control

3 微网系统仿真实验

3.1 低压微网系统

图 9 是欧盟微网项目 MICROGRIDS 提出的可用于分布式发电系统研究的典型低压微网系统^[12]。系统频率是 50 Hz，电压等级为 400 V，详细参数可参见文献[14]。在微网和配网的公共连接点 PCC 处设置断路器，通过 PCC 处断路器的开闭控制微网孤岛运行和并网运行状态的切换。微网内共有 5 处负荷，本文算例分别在负荷 L3、L4 和 L5 处接入分布式电源，形成了一个多电源多负荷的低压微网。L3

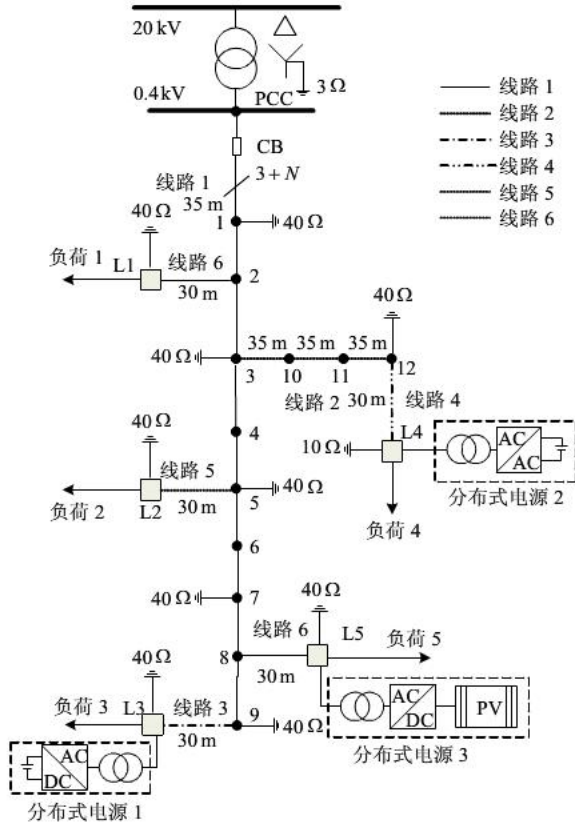


图9 典型低压微网系统

Fig. 9 Typical low voltage micrograd

和L4处分布式电源采用直流电压源和逆变器模拟，重点研究控制策略的协调配合。L5处分布式电源采用详细的单级光伏系统，验证微网协调控制策略在模式切换时对进行最大功率跟踪策略的波动型分布式电源的有效性。算例中具体分布式电源参数详见附录表A2。

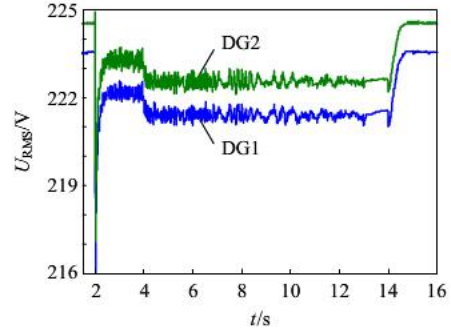
3.2 算例分析

3.2.1 算例1

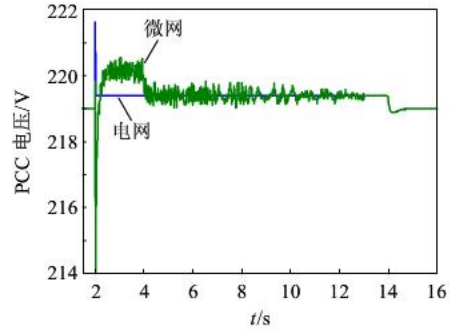
微网初始时运行在并网状态，在2s时假设发生计划性孤岛，PCC处的断路器断开，DG1和DG2共同分担系统负荷，DG3维持最大功率跟踪控制不变；在4s时，微网进行同步并网控制；13s时，微网系统完成和外部配网的同步过程，闭合断路器，以实现微网和外部电网的平稳连接；14s时系统恢复并网控制策略，整个系统回到最初运行点。算例采用Matlab仿真平台，仿真时间为16s，采用变步长的2阶算法，数据采样时间为1ms。

算例1中各负荷参数详见附录表A3，DG1和DG2功率参考值均为50kW和0kvar，整个微网系统向外部电网输送有功功率45kW，吸收无功功率25kvar。

从图10和图11中可以看出，仿真算例在转换



(a) DG1和DG2出口电压有效值



(b) PCC两端电压有效值

图10 算例1的电压仿真结果

Fig. 10 Simulation results of voltage in case 1

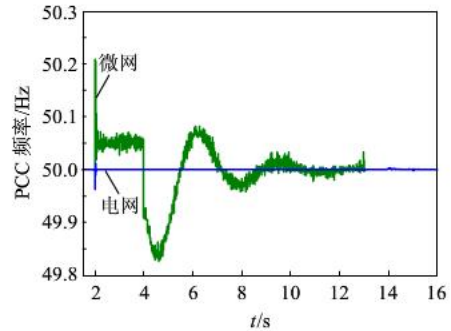


图11 算例1的频率仿真结果

Fig. 11 Simulation results of frequency in case 1

瞬间分布式电源出口处电压和频率冲击最大，约为7V和0.2Hz，但此时由于电压下降较小，控制参数没有启动自动调节。在4s时，微网进行同步并网控制，PCC微网端口的电压与电网端口电压慢慢重合，最终达到同步要求。13s微网重新并网后，对电压没有冲击，但此时系统仍维持微网在孤岛状态下的功率输出；最后在14s时，DG1和DG2恢复恒功率控制，微网系统运行状态也回到并网状态初始运行点。

从图12可以看出：在2s之前的并网运行时，DG1和DG2满足恒功率控制要求；在转为孤岛运行的时刻，由于微网内部负荷为75kW和25kvar，DG3在外部环境条件不变的情况下保持10kW的有功功率输出，不提供无功功率。由于容量和下垂

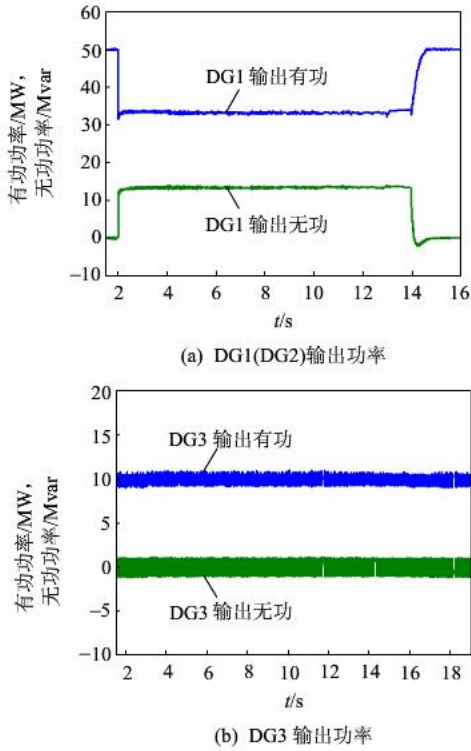


图 12 算例的输出功率仿真结果

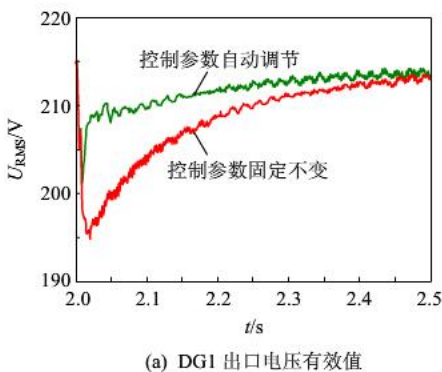
Fig. 12 Simulation results of output power in case 1

系数一致，微网内其余负荷由 DG1 和 DG2 均分，分别提供约 32.5kW 和 12.5 kvar，此时频率相应提高约 0.05 Hz，电压下降约 1.3 V。在同步并网过程中，各分布式电源功率输出保持不变，并且该过程满足 IEEE 1547^[15]分布式电源并网标准规定，电压最终在重新并网及恢复并网控制后回到初始运行状态。

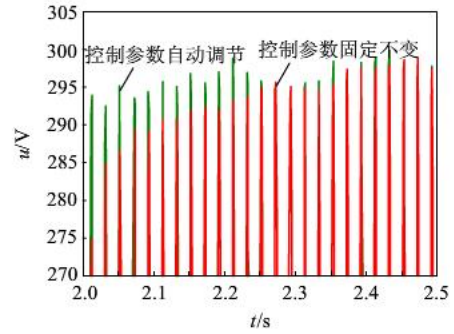
3.2.2 算例 2

算例 2 中各负荷参数详见附录表 A4，DG1 和 DG2 此时功率参考值均为 20kW 和 0kvar，整个微网系统从配网吸收有功功率 10kW、无功功率 90 kvar。

图 13 为在电压环控制参数固定不变和控制参数自动调节 2 种方式下 DG1 出口电压有效值和瞬时值的仿真结果比较。从图 13 可以看出，在并网



(a) DG1 出口电压有效值



(b) DG1 出口 B 相电压瞬时值

图 13 算例 2 中脱网时电压仿真结果

Fig. 13 Simulation results of voltage in case 2 when islanding occurs

运行切换到孤岛运行时超过了电压限值，控制参数进行自动调节。通过瞬时值可以看出，电压幅值的跌落明显减小，在一个周期内就恢复到有效值下限对应的瞬时值 295 V 附近，消除了由于无功功率不匹配和控制器响应速度慢引起的较大幅值的电压跌落，提高了脱网时的电压调节速度。

4 结论

本文对传统的 $P-f$ 和 $Q-V$ 下垂控制进行了改进，实现了并网运行时基于下垂控制的间接恒功率控制方式，避免了采用直接功率控制导致的运行模式变化时的控制策略切换，并在脱网过程中采用控制参数自动调节机制，有利于微网系统的平滑过渡。分析了微网在孤岛转并网过程中基于频率和幅值参考项正反馈的同步并网控制原理，该方法利用公共连接点电压信息对下垂控制进行反馈调节，在不改变分布式电源原有输出功率的前提下，消除断路器两端电压偏差，最终实现微网的同步并网。本文最后在含有多个分布式电源的欧盟低压微网系统上实现了上述控制方式，进行了并网转孤岛再重新并网的全过程仿真，仿真结果验证了所提出的微网控制策略的有效性。

参考文献

[1] 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(in Chinese).

[2] Barsali S, Ceraolo M, Pelacchi P, et al. Control techniques of dispersed generators to improve the continuity of electricity supply[C]//IEEE Power Engineering Society 2002 Winter Meeting. New York, USA: IEEE PES, 2002:

- 1239-1243.
- [3] 牟晓春, 毕大强, 任先文. 低压微网综合控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 91-96.
Mou Xiaochun, Bi Daqiang, Ren Xianwen. Study on control strategies of a low voltage microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 91-96(in Chinese).
- [4] 王赞, 肖岚, 姚志垒, 等. 并网独立双模式控制高性能逆变器设计与实现[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 55-59.
Wang Zan, Xiao Lan, Yao Zhilei, et al. Design and implementation of a high performance utility-interactive inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 55-59(in Chinese).
- [5] 黄伟, 牛铭. 微电网非计划孤岛控制策略分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 42-46.
Huang Wei, Niu Ming. Analysis on non-planned isolated control strategy for microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 42-46(in Chinese).
- [6] Il-Yop C, Wenxin L, Cartes D A, et al. Control methods of inverter-interfaced distributed generators in a microgrid system[J]. IEEE Trans. on Industrial Applications, 2010, 46(3): 1078-1088.
- [7] 纪明伟, 张兴, 杨淑英. 基于电压源逆变器的微电网控制策略[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2009, 32(11): 1678-1682.
Ji Mingwei, Zhang Xing, Yang Shuying. Study on the control strategies of voltage source inverter in micro-grid[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2009, 32(11): 1678-1682(in Chinese).
- [8] Guerrero J M, Vasquez J C, Matas J, et al. Control strategy for flexible microgrid based on parallel line-interactive UPS systems[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 726-736.
- [9] Engler A. Applicability of droops in low voltage grids[J]. International Journal of Distributed Energy Resources, 2005, 1(1): 1-6.
- [10] Yunwei L, Vilathgamuwa D M, Poh C L. Design, analysis, and real-time testing of a controller for multi-bus microgrid system[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2004, 19(5): 1195-1204.
- [11] 肖朝霞, 王成山, 王守相. 微网中分布式电源逆变器的多环反馈控制策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 100-107.
Xiao Zhaoxia, Wang Chengshan, Wang Shouxiang. Multiple feedback loop control scheme for inverters of the micro source in microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 100-107(in Chinese).
- [12] Robert H L, Piagi P. Control and design of microgrid components (final project report)[R]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 2006.
- [13] Yunwei L, Ching N. An accurate power control strategy for power-electronics-interfaced distributed generation units operating in a low-voltage multibus microgrid[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2009, 24(12): 2977-2988.

- [14] Papathanassiou S, Hatziaargyriou N, Strunz K. A benchmark low voltage microgrid network[C]//CIGRE Symposium. Athens, Greece: CIGRE, 2005: 1-5.
- [15] Standard Coordinate Committee 21. IEEE 1547 IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems[R]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2003.

附录 A

表 A1 电压环系统参数

Tab. A1 Parameters of voltage loop

U_{dc}/V	R_f/Ω	L_f/mH	$C_f/\mu F$	K_{p2}	K_{i2}	τ/s
1 000	0.001	1.5	300	1(10)	5(50)	0.005

表 A2 低压微网分布式电源和负荷参数

Tab. A2 Parameters of DGs and loads in low voltage microgrid

元件	参数
DG1	60kVA, 下垂系数 $m=0.003$ Hz/kW, $n=0.1$ V/kvar
DG2	60kVA, 下垂系数 $m=0.003$ Hz/kW, $n=0.1$ V/kvar
DG3	10kVA, 最大功率跟踪控制

表 A3 算例 1 的负荷参数

Tab. A3 Load parameters in case 1

元件	P/kW	$Q/kvar$
L1	20	0
L2	20	10
L3	15	10
L4	10	0
L5	10	5

表 A4 算例 2 的负荷参数

Tab. A4 Load parameters in case 2

元件	P/kW	$Q/kvar$
L1	20	10
L2	20	50
L3	10	10
L4	20	10
L5	20	10



王成山

收稿日期: 2011-12-08。

作者简介:

王成山(1962), 男, 长江学者特聘教授, 从事电力系统安全性分析、城市电网规划和配电系统自动化、分布式发电等方面的研究, cswang@tju.edu.cn;

高菲(1984), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统电磁暂态仿真与分布式发电技术, gaofei0119@gmail.com;

李鹏(1981), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统电磁暂态仿真与分布式发电技术, lip@tju.edu.cn。

(责任编辑 刘浩芳)

Control Strategy Research on Low Voltage Microgrid

WANG Chengshan, GAO Fei, LI Peng, HUANG Bibin, DING Chengdi, YU Hao

(Tianjin University)

KEY WORDS: improved droop control; parameter adjustment; reference positive feedback; grid synchronization control; low voltage microgrid

A microgrid needs the coordination control of distributed generation to ensure effective regulations of power and voltage in both the grid-connected mode and the islanding mode. The coordination control should function when the operating mode changes to achieve the supporting role of microgrid. So the microgrid can maintain the continuous supply of important local load when external power is lost.

The typical droop control based on P - f and Q - V characteristics is improved in the paper. A reactive power control is applied to form three control loops, which contain the inner root mean square (RMS) voltage loop, the intermediate droop loops and the outer reactive power loop. The improved method achieves indirect constant power control with connection of power grid, and avoids the switch of control strategies with change of operating modes. The control diagram is shown in Fig. 1.

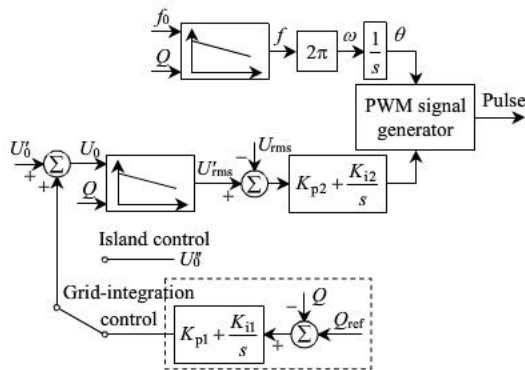


Fig. 1 Improved droop control diagram

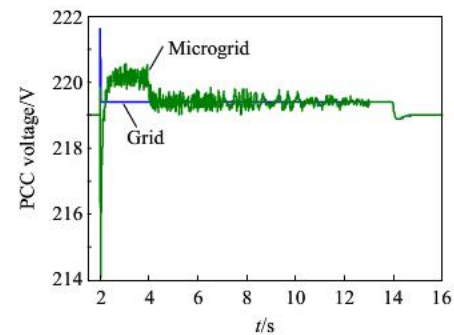
The control parameters k_{p2} and k_{i2} affect the dynamic response of the inner voltage loop. But the large control parameters for rapid response may lead to the system instability. An adjustment method for control parameters is proposed to increase or decrease the parameters based on the RMS voltage. This method guarantees the stability when small disturbance happens, as well as the dynamic performance of voltage reference during the process of operating modes switch; and it also reduces the voltage fluctuation caused by the power mismatch effectively.

$$k_p(k) = \begin{cases} \alpha k_p(k-1), & |U_{rms} - U_e| > U_{th} \\ \beta k_p(k-1), & |U_{rms} - U_e| \leq U_{th} \end{cases} \quad (1)$$

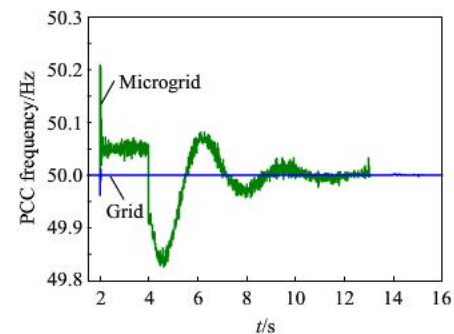
$$k_p(k) \geq k_{pmin}$$

Grid synchronization control based on the positive feedback is analyzed. It is applied when the microgrid prepares to connect to the grid. The control process eliminates the deviation of voltage phase and amplitude between microgrid and grid through the new frequency and voltage references. In the synchronization control, the microgrid maintains the output of DGs and enables the operating point to move smoothly.

The simulation cases are based on the benchmark low voltage microgrid proposed by European program ‘MICROGRIDS’. The simulation results of low voltage microgrid in Fig. 3 show that the proposed control methods enhance the voltage control when islanding occurs, complete the smooth reconnection of the microgrid, and reduce the impact to the microgrid when the operating mode changes.



(a) RMS voltage of PCC



(b) Frequency of PCC

Fig. 3 Results of voltage and frequency in case 1