

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181346

微网系统稳定运行及模式平滑切换研究

张明锐, 王佳莹, 宋柏慧, 韦莉

(同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要: 提出了一种基于对等结构的控制策略, 实现微网系统在并网和孤岛两种模式下的稳定运行和平滑切换。稳定运行时的多环控制策略包含电压-相角下垂控制、虚拟阻抗控制和电压电流双环控制, 可按逆变器额定容量之比精确分配负荷功率, 保持系统电压幅值、频率的稳定。并网时采用基于双二阶广义积分器及锁频环的电压同步策略, 使微网的电压幅值、相角快速向主网同步, 从而平滑并网。解列时设计了功率同步策略, 通过降低微网与主网间的交互功率, 抑制切换时的功率冲击。仿真结果表明, 所提控制策略能够保证微网系统的稳定运行, 同时在过渡模式下, 减小网络冲击, 稳定系统频率, 实现模式平滑切换。

关键词: 下垂控制; 模式切换; 双二阶广义积分器; 电压同步; 功率同步

Study on stable operation and mode smooth transition of microgrid

ZHANG Mingrui, WANG Jiaying, SONG Baihui, WEI Li

(College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: A control strategy based on peer-to-peer structure is proposed, so as to realize stable operation and smooth transition between grid-connected and islanding modes of microgrid. In stable operation mode, the multiloop control strategy includes voltage-phase droop control, virtual impedance control and voltage-current dual loop control. According to the ratio of the rated capacity of the inverters, the load power can be precisely distributed. Also, it can maintain the voltage amplitude and frequency of the system. In grid connecting transition mode, a voltage synchronization strategy is proposed. It is based on dual second-order generalized integrator and frequency locked loop, which synchronizes the voltage amplitude and phase of microgrid with the main grid in a short time, so that it can be connected to the main grid smoothly. In grid disconnecting transition mode, a power synchronization strategy is proposed. The overshoot of power is suppressed by reducing the interaction power between the microgrid and the main grid. The simulation results show that the proposed control strategy can maintain the stable operation of the microgrid. Also, when modes switching, it can reduce the overshoot in the grid and control the frequency of the system, so as to realize mode smooth transition.

This work is supported by National Science and Technology Support Project of China (No. 2015BAG19B02) and Project of Shanghai Committee of Science and Technology (No. 13DZ1200403).

Key words: droop control; mode transition; dual second-order generalized integrator; voltage synchronization; power synchronization

0 引言

微网的稳定运行能够有效减弱分布式发电对主网的冲击和不利影响^[1]。微网具有并网和孤岛两种运行模式^[2], 同时具备两种模式间平滑切换的能力。即在主网故障或计划孤岛时, 能够快速满足微网内

部负荷的需求; 主网恢复正常或计划并网时, 能够快速与主网电压实现同步, 平滑并网^[3-4]。微网运行模式的平滑切换是微网控制的难点与热点问题。

逆变器控制策略对微网运行模式的平滑切换有直接影响。文献[5]提出一种电压电流双模式逆变器控制策略, 在孤岛和并网模式下, 将逆变器分别控制为电压源和电流源, 模式切换时需切换控制策略, 易引起微网电能质量的恶化。可见, 稳定控制策略与模式切换策略相辅相成, 在设计切换策略时, 应

基金项目: 国家科技支撑计划项目资助(2015BAG19B02); 上海市科委项目资助(13DZ1200403)

将其加入考虑,实现一体化设计。微电网逆变器协调控制策略主要分为主从控制^[6]与对等控制,文献[7]提出由中央控制器根据系统频率和电压的变化,统一调配各分布式电源出力,以实现微电网并网与孤岛模式之间的平滑切换和孤网模式下的稳定运行,但这种控制方式不能实现分布式电源的“即插即用”。本文采用对等控制结构^[8-9],在两种运行模式下均将逆变器控制为电压源,采用下垂控制实现本地有功负荷的合理分配^[10],且在孤岛发生时逆变器无需切换控制算法,从根本上减小了两种模式切换过程中的暂态响应。

微网的模式切换研究,应将微网看作一个整体,研究其与大电网的并网/脱网运行过程,而非简单研究单个逆变器模式切换的情况。文献[11]提出了网侧电流环控制与负荷电压环控制相结合的模式切换控制方法。文献[12]通过功率预测控制和负荷电压模型预测控制实现运行模式的平滑切换。但文献[11]和文献[12]都只考虑了单个逆变器模式切换的情况。文献[13]提出一种基于虚拟同步发电机(VSG)的模式切换策略,微网由并网向孤岛切换时,微网内负荷的功率缺额由VSG提供,将微网整体考虑在内,但其间PQ控制与VSG控制的切换较为复杂。文献[14]对传统VSG控制策略进行了改进,抑制了稳态时微网中的功率振荡和频率偏移,有利于减小模式切换时的振荡,但其采用可变的阻尼系数,控制结构复杂。

本文中微网系统采用对等控制结构,提出了一种综合考虑稳定运行控制策略的微网系统模式平滑切换策略。微网并网过渡模式下采用基于双二阶广义积分器的锁频环(Dual Second-Order Generalized Integrator-Frequency Locked Loop, DSOGI-FLL),设计了电压同步模块,省略了频率同步环节,通过调节微网系统的电压幅值和相角向主网同步,减小并网电压冲击。微网解列过渡模式下采用功率同步模块,调节微网内部输出功率与负荷功率相当,系统产生的功率差额按其额定容量之比分配到各个逆变器,实现并网逆变器间的协调控制,平滑解列。同时避免了主开关的带负荷分断。最后,在Matlab/Simulink中搭建交互功率最高为20%的微网模型,验证所提控制策略在微网稳定运行和模式切换时的控制效果。

1 稳定运行控制

1.1 微网逆变器控制结构

并网逆变器是连接分布式电源与微网的重要设备^[15-16],本文采用的三相电压源型逆变器多环控制

策略如图1所示。图中, u_o 、 u_p 分别为逆变器的输出电压、PCC点的电压; i_L 、 i_o 和 i_p 分别为电感电流、逆变器的输出电流和PCC点的电流, L_G 为外接电感, Z_L 为线路阻抗; R_f 、 L_f 和 C_f 分别为三相滤波器的等效电阻、等效电感和等效电容。逆变器的多环控制主要由功率计算、电压-相角下垂控制、虚拟阻抗控制、电压电流双环控制以及并网/解列控制等几个部分组成, i_{Ldq}^* 、 u_{dq}^* 和 u_{dq}^* 分别为各控制环的参考信号。

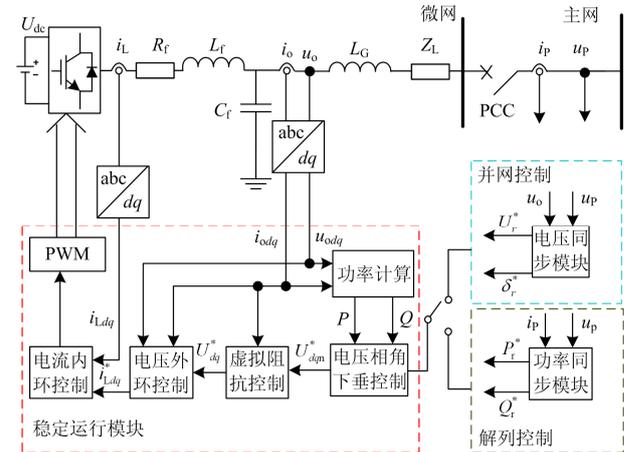


图1 逆变器多环控制结构图

Fig. 1 Multi-loop control structure of the inverter

1.2 电压-相角下垂控制

本文采用的电压-相角下垂控制,实现了功率分配与频率稳定控制的有效解耦,相较于传统的电压-频率下垂控制^[17],能够为系统提供更好的频率支撑。

电压-相角下垂控制方程^[18]为

$$\begin{cases} \delta = \delta_r - k_m(P - P_r) \\ U = U_r - k_n(Q - Q_r) \end{cases} \quad (1)$$

式中: δ_r 和 U_r 分别为逆变器工作于额定功率时的电压相角和幅值; k_m 和 k_n 分别为有功-相角、无功-电压下垂系数。

在参数设计时,使下垂系数,逆变器等效输出感抗和外接输出感抗与逆变器额定功率成反比,则可实现逆变器输出功率按比例分配,对解列过渡模式时系统产生的功率差额也有良好的分配效果。

1.3 电压电流双环控制

电压-相角下垂控制的输出量即为电压电流双环控制的输入量,目前针对电压电流双环控制的研究已较为成熟^[19-20],其控制框图如图3C所示。电压外环采用逆变器输出电压瞬时值反馈,使输出电压跟踪参考值,可稳定逆变器的输出端口电压。电流内环采用滤波电感电流反馈,使系统具有良好的

动态性能和限流能力。

1.4 虚拟阻抗控制

微网系统中, 阻感性的线路会使有功功率与无功功率相互耦合, 影响下垂控制的效果^[21-22]。故可采用虚拟阻抗控制以改善线路参数对下垂控制的影响, 提高逆变器间的功率分配精度。然而, 为了使线路呈感性而采用过大的虚拟电感会使控制器的参考电压大幅下降, 尤其在谐波含量较高的情况下, 会使输出电压严重畸变, 影响微网系统的稳定性。针对这一问题, 本文考虑将外接电感与虚拟电感相结合, 对逆变器的总输出阻抗进行调节。

由图 3 C 区的电压电流双环控制框图得到系统的闭环传递函数为

$$U_{odq} = G(s)U_{dq}^* - Z(s)I_{odq} \quad (2)$$

式中:

$$G(s) = (k_{up}s + k_{ui})(k_{ip}s + k_{il})/D(s)$$

$$Z(s) = (sL_f + R_f)s^2/D(s)$$

$$D(s) = L_f C_f s^4 + (R_f C_f + C_f k_{ip})s^3 + (1 + k_{up}k_{ip} + C_f k_{il})s^2 + (k_{up}k_{il} + k_{ip}k_{ui})s + k_{ui}k_{il}$$

$G(s)$ 为电压增益函数; k_{up} 、 k_{ui} 分别为电压外环的 PI 参数; k_{ip} 、 k_{il} 分别为电流内环的 PI 参数。

加入虚拟阻抗 $Z_n(s)$, 可得

$$U_{dq}^* = U_{dq}^* - Z_n(s)I_{odq} \quad (3)$$

代入式(2), 可得

$$U_{odq} = G(s)U_{dq}^* - (G(s)Z_n(s) + Z(s))I_{odq} \quad (4)$$

由式(3)得到逆变器的等效输出阻抗 $Z_{eq}(s)$:

$$Z_{eq}(s) = G(s)Z_n(s) + Z(s) = [L_f s^3 + (R_f + Z_n(s)k_{up}k_{ip})s^2 + Z_n(s)(k_{up}k_{il} + k_{ip}k_{ui})s + Z_n(s)k_{ui}k_{il}] / D(s) \quad (5)$$

令 $Z_n(s) = sL_n$, 以满足输出功率解耦条件。图 2 为 L_n 取不同值时, 逆变器等效输出阻抗 $Z_{eq}(s)$ 的波特图。其中, 虚拟电感 $L_{n1}=50$ mH, $L_{n2}=5$ mH, $L_{n3}=0.5$ mH。

如图 2 所示, 在工频 50 Hz 附近, $Z_{eq}(s)$ 呈现感性, 并且与 L_n 的取值成正比, 证明可通过对 L_n 的设置来调节 $Z_{eq}(s)$ 的性质和大小。

其控制框图见图 3 B 区。

2 并网过渡控制

2.1 同步检测

并网过渡模式中, 微网由孤岛向并网模式切换。为使模式切换平滑进行, 防止并网时出现大的过电压扰动^[23], 微网电压的相角和幅值应与主网电压同

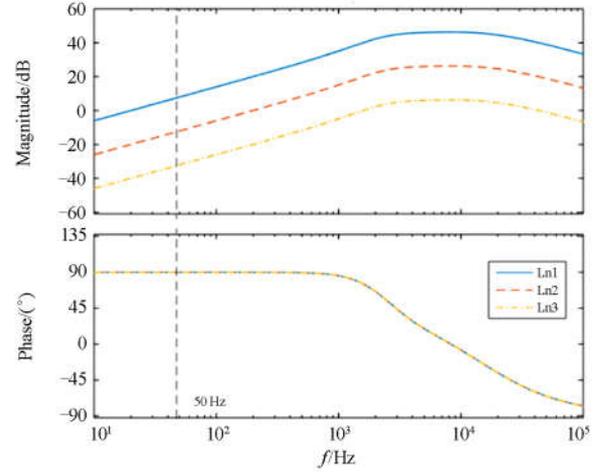


图 2 逆变器等效输出阻抗波特图

Fig. 2 Bode diagram of the equivalent output impedance of the inverter

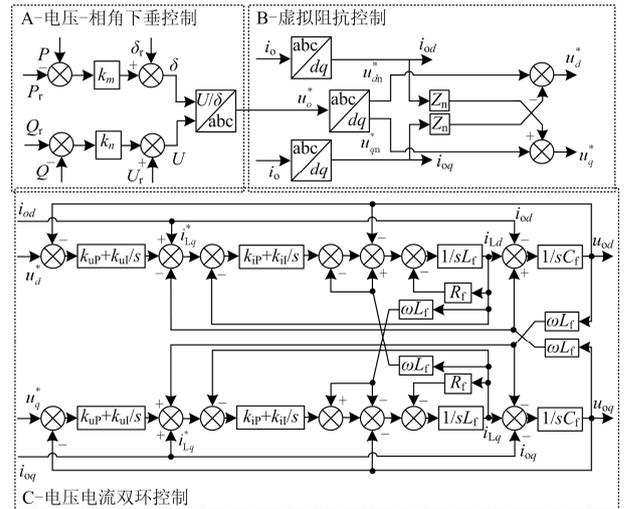


图 3 多环控制框图

Fig. 3 Block diagram of multi-loop control

步^[24]。本文提出的并网过渡模块主要由同步检测模块和同步调节模块两部分组成。同步检测模块负责检测主网和微网逆变器在本地的电压幅值、相角。

本文采用 DSOGI-FLL 进行电网电压的信号检测, 其在电网电压三相不平衡的情况下具备准确锁相的能力, 较基于同步坐标系的锁相环方法在实际工程应用中适应性更高。此外, 由于电压-相角下垂控制实现了电压频率与输出功率的分离, 系统的频率信号比相位信息更稳定, 故基于系统频率反馈的 FLL 较基于相位反馈的 PLL^[25], 在此具有更好的稳定性, 当系统发生动态变化时性能更优。

DSOGI-FLL 的控制框图如图 4 和图 5 所示。

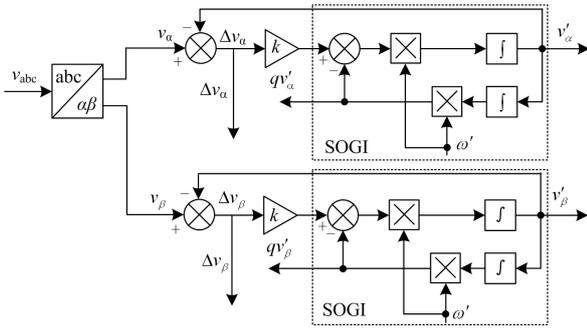


图 4 DSOGI 结构图

Fig. 4 Structure of DSOGI

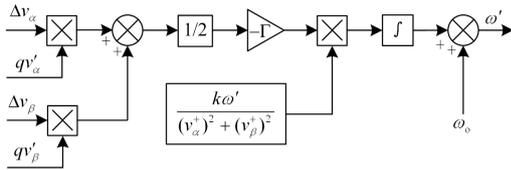


图 5 FLL 结构图

Fig. 5 Structure of FLL

其中电压 v_j 是 SOGI 的输入量(下标 $j = \alpha$ 或 β)， v_j' 是与 v_j 同相的输出量， qv_j' 是与 v_j 相差 90° 的输出量，可见通过 SOGI 能够得到一组正交的信号， Δv_j 是电压误差值， ω' 为参考频率。

由图 4 可得以下传递函数：

$$Q(s) = \frac{qv_j'}{v_j} = \frac{k\omega'^2}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \quad (6)$$

$$E(s) = \frac{\Delta v_j}{v_j} = \frac{s^2 + \omega'^2}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \quad (7)$$

其波特图如图 6 所示，可知，若 $\omega > \omega'$ ，则 qv_j' 与 Δv_j 同相；若 $\omega < \omega'$ ，则 qv_j' 与 Δv_j 反相。故可以

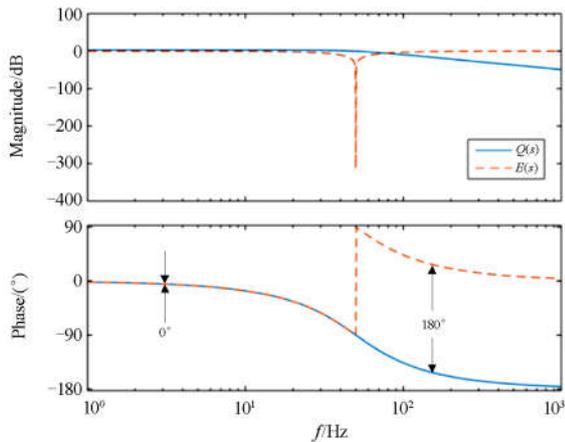


图 6 传递函数 $Q(s)$ 、 $E(s)$ 波特图

Fig. 6 Bode diagram of transfer function $Q(s)$ and $E(s)$

通过 qv_j' 与 Δv_j 的乘积控制得到频率偏差 Δf ，从而控制实际频率 ω 向 ω' 同步，最终达到一致。

由上述分析可知，输入的三相电压经 $\alpha\beta$ 坐标变换后，通过 DSOGI 得到 $\alpha\beta$ 两相上的电压误差值 Δv_j 和正交电压 qv_j' ，再将两者的乘积输入 FLL 以控制实际频率向 ω' 同步，FLL 中输出的频率反馈到 DSOGI 中，构成一个闭环。

通过其中得到的 $\alpha\beta$ 坐标系上的两组正交信号，可得正负序电压值，计算公式为

$$v_{\alpha\beta}^+ = [v_\alpha^+ \ v_\beta^+]^T = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$v_{\alpha\beta}^- = [v_\alpha^- \ v_\beta^-]^T = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & q \\ -q & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (9)$$

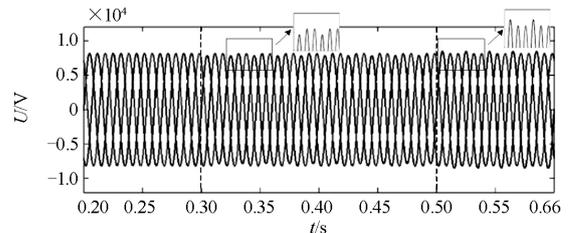
从而可得输入三相电压的幅值、相位信息为

$$U_m = \sqrt{(v_\alpha^+)^2 + (v_\beta^+)^2} \quad (10)$$

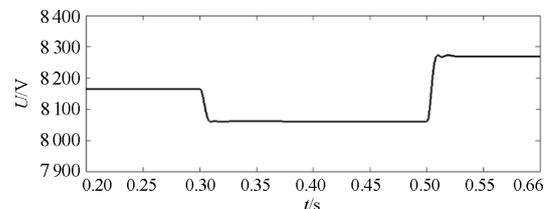
$$\delta = \sin^{-1}(v_\alpha^+ / U_m) \quad (11)$$

因在控制策略中引入了对称分量法，故本文采用的 DSOGI-FLL 在三相电压不平衡时也能有效测量电压的幅值、相位信息。

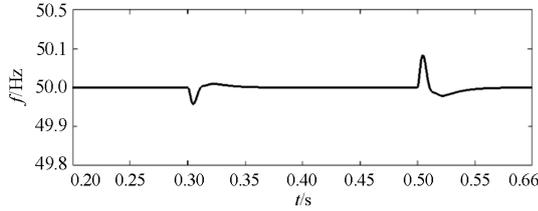
图 7 对同步检测模块的效果进行了仿真验证。取 10 kV 微网 PCC 处的电压作为同步检测模块的输入，初始时刻起三相电压均为额定值，b、c 相电压始终保持不变，a 相电压幅值 0.3 s 时下降，0.5 s 时上升。根据国标 GB/T15543-2008《电能质量三相电压不平衡》规定，电网正常运行时，负序电压不平衡度不超过 2%。因而仿真中选取的 a 相电压幅值的变化范围满足负序电压不平衡度为 2%。由图 7(b) 一图 7(d) 可知，在三相电压不平衡的情况下，本文所设计的同步检测模块同样能够有效测量电压的幅值、相位。



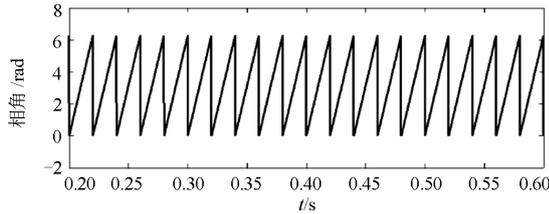
(a) 输入同步检测模块的三相电压



(b) 测得电压幅值波形



(c) 测得电压频率波形



(d) 测得电压相角波形

图 7 同步检测模块仿真效果

Fig. 7 Simulation results of synchronous detection module

2.2 同步调节

分布式电源并网时,对 PCC 处电压要求比现行国家标准更为严格^[26],为满足并网标准,设计同步调节模块。测量 PCC 处的主网电压 u_p 与微网逆变器本地输出电压 u_o ,作为同步检测模块的输入,输出得到对应的电压幅值、相角,将其作为同步调节模块的输入。在同步调节模块中,将 U_p 、 U_o 作差,经过 PI 控制器与限幅模块得到 ΔU_m ,修正下垂控制的电压参考值 U_r ,得到 U_r^* ;将 δ_p 、 δ_o 作差,同样经过 PI 调节和限幅控制得到 $\Delta\delta$,修正下垂控制的参考值 δ_r ,得到 δ_r^* 。当 $|\Delta U_m|$ 与 $|\Delta\delta|$ 小于预先设定的阈值,并能够保持不少于 100 ms 的时间,即认为电压幅值与相位达到准同步,微网向主网并网。由于 P/δ 下垂控制能够使微网频率不受负载波动的影响,始终稳定在额定频率处,故而在并网同步控制中,可省略频率同步环节,直接进行相位同步,简化了控制策略。

$|\Delta U_m|$ 与 $|\Delta\delta|$ 阈值的设定,参考了 IEEE Std 1547-2003 标准。本文设定电压幅值偏差阈值为微网额定电压的 2%,相角偏差阈值为 2° 。

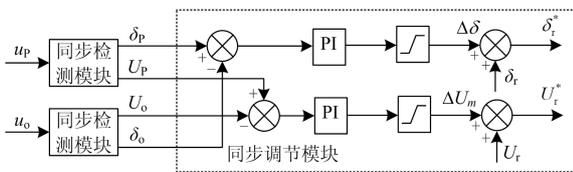


图 8 电压同步模块

Fig. 8 Voltage synchronous module

3 解列过渡控制

解列过渡模式中,微网由并网向孤岛模式切

换。在过程中,微网电压电流的冲击主要由微网发出功率与负荷功率的不平衡造成。为避免开关带负荷分断以及进入孤岛瞬间微网受到的功率冲击,应控制 PCC 点处微网与主网的交互功率为零,即微网内部能量供需平衡。设计功率同步模块如图 9 所示。

图 9 中, u_p 、 i_p 为 PCC 处主网的电压、电流值,经坐标变换后进行功率计算,得到 PCC 处的交互功率 P_p 、 Q_p ,如式(12)所示。

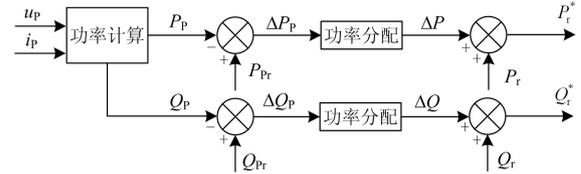


图 9 功率同步模块

Fig. 9 Power synchronous module

$$\begin{cases} P_p = 1.5(u_{pq}i_{pq} + u_{pd}i_{pd}) \\ Q_p = 1.5(u_{pq}i_{pd} - u_{pd}i_{pq}) \end{cases} \quad (12)$$

与理想的解列过渡模式 PCC 处功率参考值 P_{Pr} 、 Q_{Pr} 作差。 P_{Pr} 、 Q_{Pr} 一般取为零,以最大程度上减小向孤岛转换时的功率冲击。再将得到的功率差值分配到每个逆变器:

$$\begin{cases} \Delta P = \Delta P_p \cdot (P_{ei} / \sum_{i=1}^N P_{ei}) \\ \Delta Q = \Delta Q_p \cdot (Q_{ei} / \sum_{i=1}^N Q_{ei}) \end{cases} \quad (13)$$

式中, P_{ei} 、 Q_{ei} 分别表示第 i 台逆变器的额定有功功率、额定无功功率,共有 N 台逆变器。

所得的功率差值 ΔP 、 ΔQ 用来修正 P_r 、 Q_r ,得到下垂控制的参考值 P_r^* 、 Q_r^* 。

4 仿真分析

4.1 仿真模型与参数

在 Matlab/Simulink 平台下搭建如图 10 所示微网结构,仿真验证本文所提控制策略的有效性。本文将风机、光伏、储能作为一个整体,视为可控电源,从网侧研究逆变器间的协调控制策略。

微网的额定电压为 10 kV,额定频率为 50 Hz。微网整体容量为 1 MVA,各分布式电源备用容量为 20%,负荷为阻感性。以逆变器 1 为参考,其额定功率之比 $e_1:e_2:e_3=1:1.5:2.5$,表 1 中给出了系统参数。

4.2 稳定运行工况

工况一:初始时刻起,微网系统稳定运行于孤岛模式,负荷为 $P=800$ kW, $Q=600$ kvar;

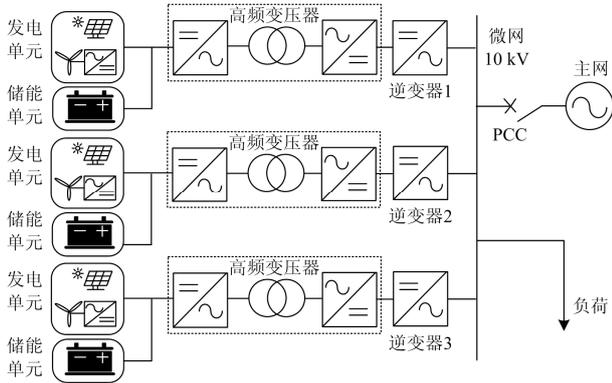


图 10 微网结构示意图

Fig. 10 Schematic of microgrid structure

表 1 仿真参数

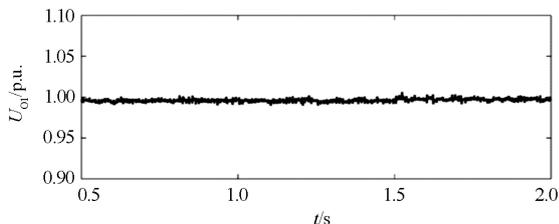
Table 1 Simulation parameter

| 参数类别 | 参数 | 参数值 |
|-------|-----------------------------------|-----------------|
| 微网参数 | P_{ci}/kW | [160, 240, 400] |
| | P_L/kW | 800 |
| | $Q_L/kvar$ | 600 |
| | $R_L/(\Omega/km)$ | 0.161 |
| | $L_L/(mH/km)$ | 0.605 |
| 逆变器参数 | L_{Gf}/mH | [15, 10, 6] |
| | R_f/Ω | 0.01 |
| | L_f/mH | 0.002 27 |
| | C_f/F | 0.031 |
| | k_{uP} | 115 |
| | k_{ui} | 205 944 |
| | k_{iP} | 0.057 7 |
| | k_{iI} | 333 |
| | $k_{mi}/(10^{-6} \text{ rad/kW})$ | [3, 2, 1.2] |
| | $k_{ni}/(10^{-2} \text{ V/kvar})$ | [5, 3.34, 2] |
| | L_{mf}/mH | [12, 8, 4.8] |

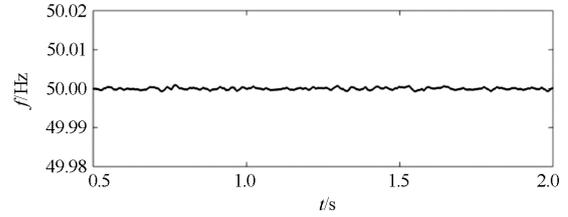
工况二: $t=1.0 \text{ s}$ 时, 负荷视在功率增长 20%, 负荷变为 $P=960 \text{ kW}$, $Q=720 \text{ kvar}$;

工况三: $t=1.5 \text{ s}$ 时, 负荷视在功率较初始降低 50%, 负荷变为 $P=400 \text{ kW}$, $Q=300 \text{ kvar}$ 。

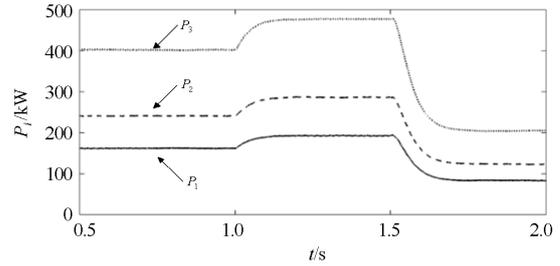
仿真结果如图 11 所示。分析图 11(a)和图 11(b), 可知本文提出的多环控制策略使微网的电压及频率在负荷变化的情况下能够保持稳定。由图 11(c)可见, 逆变器输出的有功功率始终按逆变器的额定功率比



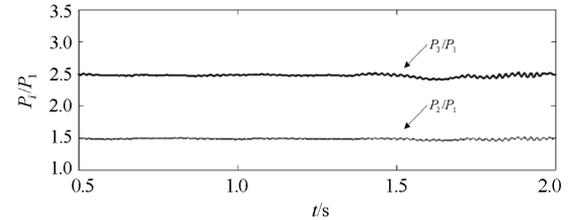
(a) 逆变器输出电压



(b) 微网频率



(c) 逆变器输出有功功率及比例



(c) 逆变器输出有功功率及比例

图 11 微网稳定运行于孤岛时控制效果

Fig. 11 Control effect when the microgrid runs stably on islanding mode

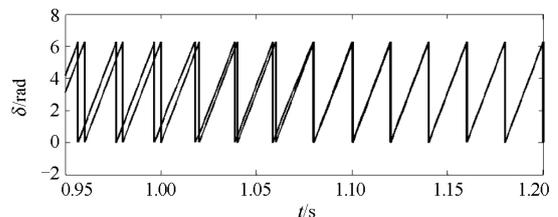
分配, 在负荷增长或下降的情况下, 始终保持 1:1.5:2.5 的比例, 验证了本文中下垂控制与虚拟阻抗控制对功率分配的良好效果。

4.3 并网过渡模式

工况一: 初始时刻起, 微网系统在额定工况下稳定运行于孤岛模式, 微网系统所带负荷为 $P=800 \text{ kW}$, $Q=600 \text{ kvar}$;

工况二: $t=1.0 \text{ s}$ 时, 微网系统接到并网信号, 进入并网过渡模式, 当微网与主网电压准同步后, PCC 处断路器合闸, 微网正式并网。

仿真结果如图 12 所示。由图 12(a)可见, 系统在 $t=1.0 \text{ s}$ 时接到并网信号, 开启电压相角同步控制。在控制策略作用下, 微网与主网电压相角逐渐同步。由图 12(b)可知, 在 $t=1.1 \text{ s}$ 时, 两者电压相角达到



(a) 微网与主网相角同步效果

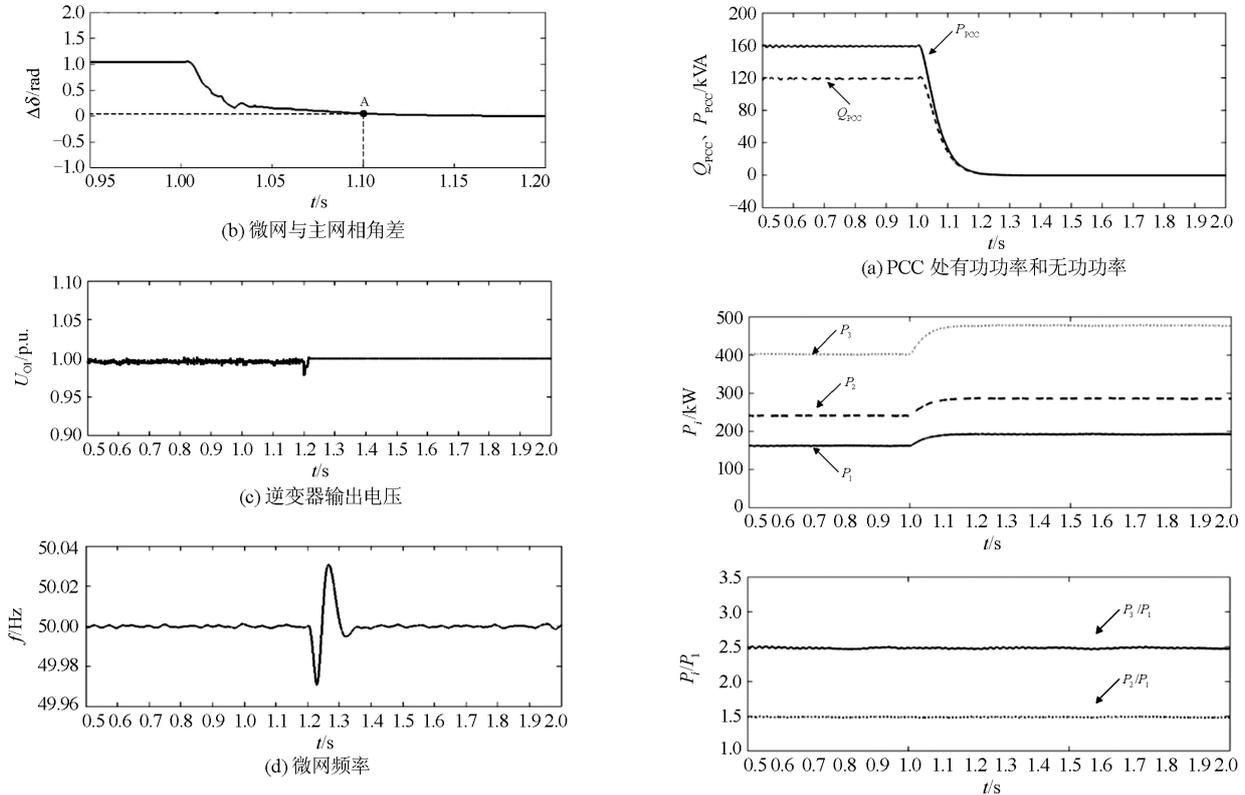


图 12 并网过渡模式控制效果

Fig. 12 Control effect when the microgrid runs on grid connecting transition mode

准同步, A 点处相角差为 2° , 即约 0.035 rad , 此后 0.1 s 内相角差始终小于 2° , $t=1.2 \text{ s}$ 时微网进入并网稳定运行模式。分析图 12(c)和图 12(d), 可知并网过程中, 微网电压及频率平滑过渡。

4.4 解列过渡模式

工况一: 初始时刻起, 微网系统在额定工况下稳定运行于并网模式, 微网系统所带负荷为 $P=960 \text{ kW}$, $Q=720 \text{ kvar}$;

工况二: $t=1.0 \text{ s}$ 时, 微网系统接到解列信号, 进入解列过渡模式; $t=1.2 \text{ s}$ 时, PCC 处功率接近于零, 微网正式解列, 进入孤岛模式。

仿真结果如图 13 所示。图 13(a)中, 初始工况下, 微网运行于并网模式, 与主网的交互功率设定为微网整体容量的 20%, 主网向微网输出功率, $t=1.0 \text{ s}$ 时, 微网进入解列过渡模式, 在功率同步模块的控制下 PCC 处的交互功率迅速下降。 $t=1.2 \text{ s}$ 时, 微网内部的功率输出与负荷相当, 表现为 PCC 处功率接近零, 此时微网正式解列。由图 13(b)可知, 功率差额由各个逆变器按比例承担。分析图 13(c)和图 13(d), 可知解列过程中, 微网电压和频率平滑过渡。

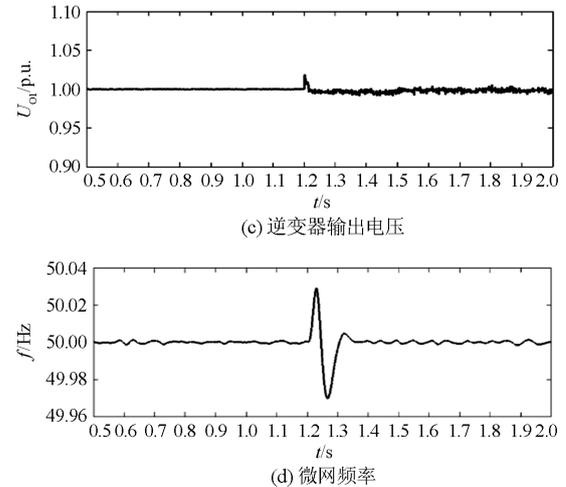


图 13 解列过渡模式控制效果

Fig. 13 Control effect when the microgrid runs on grid disconnecting transition mode

5 结论

本文针对微网系统整体的模式平滑切换问题提出了一种一体化的控制策略。通过基于对等控制的稳态控制策略, 直接避免了模式切换时因控制策略变换产生的冲击。在并网过渡模式下, 通过基于双二阶广义积分器及锁频环的电压同步模块, 将微网

的电压相角向主网同步, 减小并网冲击, 且适用于三相电压不平衡的工况, 实用性高。在解列过渡模式下, 通过功率同步模块, 降低微网与主网间的交互功率, 协调各个逆变器按比例承担功率差额, 减小微网脱网过程中受到的冲击。本文所提的微网控制策略, 具有模式切换过程冲击小, 微网电压、频率稳定, 功率按逆变器额定容量之比精确分配的特点。

参考文献

- [1] 王龙宇, 刘灿, 王丙东, 等. 考虑微网充电站影响的输电线路风险评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 114-121.
WANG Longyu, LIU Can, WANG Bingdong, et al. Risk based assessment method for transmission system considering the influence of micro-grid charging station[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 114-121.
- [2] 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(21): 9-15.
YAN Xiangwu, WANG Xinghai, WANG Yueru. A Lagrange interpolation based virtual power droop control method for microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 9-15.
- [3] DAS D, GURRALA G, SHENOY U J. Linear quadratic regulator based bumpless transfer in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1): 416-423.
- [4] 袁昊哲, 杨苹. 串联结构多微网并离网模式切换控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 94-100.
YUAN Haozhe, YANG Ping. Grid-connected and off-grid mode switching control strategies of multi-microgrid with series structure[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 94-100.
- [5] ARVIND H K, KEERTHI U, SUSHIL T. Control scheme for seamless operating mode transfer of AC microgrid[C] // 2017 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering, August 14-17, 2017, Oshawa, ON, Canada: 123-130.
- [6] 马经纬, 王晓梅, 陈淼, 等. 基于多智能体系统的智能微网分散协调控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(11): 15-23, 31.
MA Jingwei, WANG Xiaomei, CHEN Miao, et al. A decentralized control method for smart micro-grid based on multi-agent system[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(11): 15-23, 31.
- [7] 吴云亮, 肖峥, 闫秉科, 等. 微电网协调频率和电压控制策略研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(2): 15-20.
WU Yunliang, XIAO Zheng, YAN Bingke, et al. Coordinated frequency and voltage control strategy for microgrid[J]. Smart Power, 2017, 45(2): 15-20.
- [8] 芦思晨, 潘再平. 无储能风电微网系统的下垂控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(18): 169-175.
LU Sichen, PAN Zaiping. Droop control strategy of wind power microgrid system without energy storage device[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(18): 169-175.
- [9] FENG X T, ZHANG A M, ZHANG H, et al. The integrated control strategy of microgrid based on the voltage source inverter[C] // Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference, July 28-30, 2014, Nanjing, China: 8222-8227.
- [10] 张野, 熊卿, 杨健. 微电网中电压源型逆变器无功优化控制策略研究[J]. 广东电力, 2017, 30(4): 50-54.
ZHANG Ye, XIONG Qing, YANG Jian. Research on control strategy for reactive power optimization of voltage-source inverter in micro-grid[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(4): 50-54.
- [11] LI X, ZHANG H, SHADMAND M B, et al. Model predictive control of voltage source inverter with seamless transition between islanded and grid-connected operations[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(10): 7906-7918.
- [12] 涂娟, 汤宁平. 基于改进型DSOGI-PLL的电网电压同步信号检测[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2350-2356.
TU Juan, TANG Ningping. Synchronizing signal detection for grid voltage based on modified DSOGI-PLL[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2350-2356.
- [13] 石荣亮, 张兴, 徐海珍, 等. 基于虚拟同步发电机的微网运行模式无缝切换控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(10): 16-23.
SHI Rongliang, ZHANG Xing, XU Haizhen, et al. Seamless switching control strategy for microgrid operation modes based on virtual synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(10): 16-23.
- [14] 王超, 武健, 魏家昊, 等. 改进型虚拟同步发电机控制策略[J]. 广东电力, 2017, 30(12): 38-42.
WANG Chao, WU Jian, WEI Jiahao, et al. Control strategy for improved virtual synchronous generator[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(12): 38-42.
- [15] XU Y. Robust finite-time control for autonomous operation of an inverter-based microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(5): 2717-2725.
- [16] 叶吉亮, 李岚, 刘海霞, 等. 电网电压不平衡及谐波状态下的并网逆变器控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 113-119.
YE Jiliang, LI Lan, LIU Haixia, et al. Control strategy of

- grid-connected inverter under unbalanced and harmonic voltage condition[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(6): 113-119.
- [17] 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 for microgrid based on adaptive droop control[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(18): 68-74.
- [18] 张明锐, 杜志超, 王少波, 等. 高压微网运行模式切换控制策略[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(2): 153-162.
ZHANG Mingrui, DU Zhichao, WANG Shaobo, et al. Control strategies of high-voltage microgrid for operation modes switching[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(2): 153-162.
- [19] QUAN X, DOU X, WU Z, et al. A novel dominant dynamic elimination (DDE) control for voltage-controlled inverter[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(8): 6800-6812.
- [20] 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.
- [21] 陈杰, 刘名凹, 陈新, 等. 基于下垂控制的逆变器无线并联与环流抑制技术[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(7): 1450-1460.
CHEN Jie, LIU Ming'ao, CHEN Xin, et al. Wireless parallel and circulation current reduction of droop-control inverters[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(7): 1450-1460.
- [22] 闫朝阳, 张喆, 白鹤, 等. HFLMI 并联系统改进虚拟阻抗及功率滤波新方法[J]. *太阳能学报*, 2017, 38(8): 2159-2167.
YAN Zhaoyang, ZHANG Zhe, BAI He, et al. New method improving virtual impedance and power filter in parallel system of HFLMI[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2017, 38(8): 2159-2167.
- [23] 张贵涛, 易浩民, 彭显刚. 基于预测模型的光伏并网过电压控制[J]. *智慧电力*, 2017, 45(9): 20-25.
ZHANG Guitao, YI Haomin, PENG Xiangang. Grid-connected photovoltaic over-voltage control based on prediction model[J]. *Smart Power*, 2017, 45(9): 20-25.
- [24] 徐瑞东, 周建勇, 宋淑贞, 等. 对等结构的微网逆变器控制策略研究[J]. *电力电子技术*, 2017, 51(8): 104-108.
XU Ruidong, ZHOU Jianyong, SONG Shuzhen, et al. Research on the control scheme for inverter of microgrid based on peer-to-peer architecture[J]. *Power Electronics*, 2017, 51(8): 104-108.
- [25] 杨苓, 陈燕东, 陈智勇, 等. 弱电网下考虑锁相环影响的三相并网系统相角补偿控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(20): 6099-6109.
YANG Ling, CHEN Yandong, CHEN Zhiyong, et al. The phase compensation control method considering the effect of phase locked loop for three-phase grid-connected system in the weak grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(20): 6099-6109.
- [26] 徐莉娜, 曹炜, 侯亚文, 等. 基于并网逆变器的无功协调控制研究[J]. *电网与清洁能源*, 2017, 33(5): 92-103.
XU Lina, CAO Wei, HOU Yawen, et al. Coordinated control of var compensation based on grid-connected converter[J]. *Power System and Clean Energy*, 2017, 33(5): 92-103.

收稿日期: 2018-10-30; 修回日期: 2019-02-02

作者简介:

张明锐(1971—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为分布式发电与微网技术、电力系统能量管理与优化运行、轨道交通牵引供电系统; E-mail: zmr@tongji.edu.cn

王佳莹(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为分布式电源并网; E-mail: jennica@tongji.edu.cn

宋柏慧(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为分布式电源并网。E-mail: belle_song@163.com

(编辑 周金梅)