

微电网改进负荷功率分配策略与并网稳定性分析

郑连清^{1,2}, 庄琛¹, 马世强², 王晓旭¹

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室 重庆 400044;
2. 新疆生产建设兵团兴新职业技术学院, 新疆 乌鲁木齐 830074)

摘要: 由于低压微电网孤岛运行受线路阻抗特性等因素的影响,采用传统下垂控制无法按分布式电源(DG)单元容量合理分配功率,且孤岛微电网的电压和频率与大电网不同,并网前需进行同步控制。在分析并网逆变器功率分配机理的基础上,提出了改进的负荷功率分配控制策略。重新设计了 $Q-U$ 下垂控制环,增加无功误差积分修正项,优化了微电网内部的功率分配。对微电网进行了并网同步控制,并建立了控制系统小信号模型,对改进负荷功率分配策略与并网同步控制的系统稳定性进行了分析。仿真结果表明采用所提控制策略后,无功功率可被合理分配,并网暂态过程平滑稳定。

关键词: 微电网; 负荷功率分配; 负荷管理; 并网; 同步; 稳定性; 控制; 孤岛; 下垂控制; 分布式发电
中图分类号: TM 72 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.04.003

0 引言

微电网是由多种分布式电源(DG)和负荷组成,含有变换器、储能系统、通信等多种技术的小型电力系统,可运行在并网和孤岛 2 种模式下,并可实现 2 种模式间的无缝切换^[1]。通过对微电网的灵活控制,提高供电可靠性和电能质量,避免 DG 单独供电对电网安全性、稳定性和电能质量等造成冲击^[2]。

保证微电网稳定运行的控制目标包括系统电压、频率、传输功率、能量管理以及经济优化^[3-6]。孤岛模式时,逆变器采用下垂控制,根据 DG 输出的有功、无功与系统频率、电压之间的对应关系实现负荷功率的合理分配^[7-9]。但传统下垂控制稳定性较弱,由于功率耦合等原因,导致功率无法合理分配。有学者提出在控制环中添加虚拟阻抗,以保证微源输出阻抗呈阻感性^[10-11]。文献^[12]提出了一种无功精确分配的方法,但该方法增加了控制的复杂性,并可能导致线路电流的畸变。文献^[13]通过电压变化率的下垂控制改进负荷分配,需额外的恢复调节使稳态误差为零,控制环节中积分项较多不利于系统稳定。

另一方面,微电网孤岛模式下的并网同步控制也是一个较为重要的问题。目前大多数研究均采用电压相角同步控制^[14-15],文献^[16]提出的新型并网同步控制,同样是基于电压相角的同步思想。该方法简单有效,但考虑改进负荷控制的并网效果与稳定性研究较少。

本文在孤岛微电网并联逆变器下垂控制的基础上提出改进负荷分配控制策略,并建立了考虑并网

同步控制的小信号模型,采用特征值分析法对参数进行分析,保证微电网运行的动态性能与稳定性。通过增加无功误差积分修正项,设计新型的 $Q-U$ 下垂控制,改善了功率分配的精确度。通过合理设计,仿真验证了所提出控制策略的有效性。

1 微电网逆变器并联系统

传统 $P-\omega$ 与 $Q-U$ 下垂控制可用图 1 所示电路表示,其中,微源输出的电压分别为 $U_1 \angle \delta_1$ 和 $U_2 \angle \delta_2$,公共连接点 PCC(Point of Common Coupling)即负荷处的电压为 $U_p \angle \delta_p$ 。线路上传输的功率即可用式(1)、(2)表示。

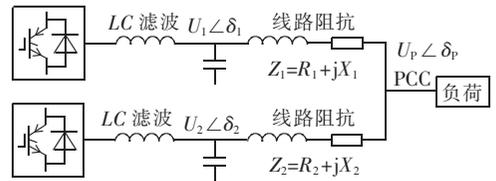


图 1 微源逆变器简化电路

Fig.1 Simplified circuit of DG inverter

$$P_x = \frac{U_x}{R_x^2 + X_x^2} [R_x(U_x - U_p \cos \delta_x) + X_x U_p \sin \delta_x] \quad (1)$$

$$Q_x = \frac{U_x}{R_x^2 + X_x^2} [-R_x U_p \sin \delta_x + X_x (U_x - U_p \cos \delta_x)] \quad (2)$$

其中, $x=1, 2, \dots$ 为微源的个数; U_x 为各微源输出电压幅值; R_x, X_x 分别为各微源线路的电阻和电抗; δ_x 为逆变器输出电压矢量 U_x 与 PCC 电压矢量 U_p 之间的相角差。若线路电阻 R_x 趋近于零,则线路阻抗为感性,式(1)和(2)则可简写为:

$$P_x = \frac{U_x U_p}{X_x} \sin \delta_x \quad (3)$$

$$Q_x = \frac{U_x (U_x - U_p \cos \delta_x)}{X_x} \quad (4)$$

根据方程(3)和(4)可得微源逆变器输出的有功

收稿日期:2014-09-11;修回日期:2015-03-01
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277191)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277191)

功率和无功功率分别与输出电压角频率和幅值有关,因此可通过式(5)、(6)对输出电压角频率和幅值进行调节。

$$\omega = \omega^* - m(P - P^*) \quad (5)$$

$$U = U^* - n(Q - Q^*) \quad (6)$$

其中, m 为角频率下垂系数; n 为电压下垂系数; ω^* 为系统额定角频率; U^* 为系统额定相电压幅值; P^* 、 Q^* 分别为微源输出额定有功和无功功率。该方法通过在逆变器控制环节添加功率环的比例调节,以实现有功与无功的解耦控制。

目前下垂控制主要采用三环反馈控制结构,功率环如式(5)、(6)所示,在产生电压幅值和频率的参考信号后,采用电压电流双环,内环控制器用于电流控制,动态响应快,改善系统性能;外环控制器用于产生内环参考信号,对电压进行反馈调节^[16-17]。本文所采用的双环控制如图 2 所示,图中, C_f 、 L_f 分别为滤波电容、电感; ω 为下垂参考角频率; U_{od}^* 、 U_{oq}^* 分别为参考电压 d 轴、 q 轴分量; m_d 、 m_q 分别为逆变器电压调制比的 d 轴、 q 轴分量; K_{pwm} 为调制比为 1 时的逆变器增益,即 $U_{dc}/2$; I_{od} 、 I_{oq} 分别为微源输出电流 I_o 的 d 轴、 q 轴分量 (I_o 为经滤波后的输出电流,不包含滤波器电容电流);电压环采用 PI 控制稳定输出电压,电流环采用比例控制器提高响应速度。

2 改进控制策略

2.1 改进无功下垂控制

考虑微电网各 DG 等效输出阻抗,以及线路阻抗不匹配时,会产生相应阻抗压降影响并联 DG 的无功负荷分配精确度^[13]。

为达到功率合理分配的目的,DG 输出功率与下垂系数通常应满足如下关系:

$$m_1 P_1 = m_2 P_2 = \dots = m_x P_x \quad (7)$$

$$n_1 Q_1 = n_2 Q_2 = \dots = n_x Q_x \quad (8)$$

其中, m_x 、 n_x 为各微源下垂系数; P_x 、 Q_x 分别为各微源输出有功和无功功率。

图 3 为 DG 间无功功率分配示意图, DG_1 与 DG_2 功率分配存在误差,其无功功率分别为 Q_{11} 和 Q_{21} ,并未按容量比例精确分配。而 DG_1 与 DG_2 的预期

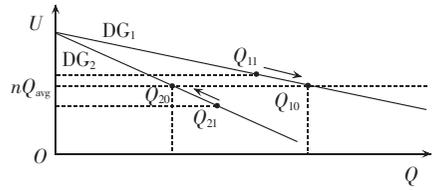


图 3 无功负荷分配控制原理

Fig.3 Control principle of reactive load allocation

功率值应为 Q_{10} 和 Q_{20} ,当功率合理分配时, $n_1 Q_1$ 和 $n_2 Q_2$ 的值相等,即各 DG 的 $Q-U$ 控制中电压下垂量应相等。为使功率分配达到预期目标,引入无功下垂平均因子 nQ_{avg} ,即各 DG 下垂量 $n_1 Q_1$ 、 $n_2 Q_2$ 均等于 nQ_{avg} 时,无功负荷分配达到理想效果。

无功下垂平均因子 nQ_{avg} 可由式(9)进行计算:

$$nQ_{avg} = \frac{n_1 Q_1 + n_2 Q_2 + \dots + n_x Q_x}{x} \quad (9)$$

由于微电网中 DG 单元采用下垂控制,具有即插即用的特点,因此 DG 间无相互通信功能。为采集各 DG 无功下垂量 $n_x Q_x$,并计算得到 nQ_{avg} ,采用二级中央控制器结构,通过低带宽的远程通信系统与 DG 单元交换数据信息,各 DG 间保持即插即用特性,如图 4 所示, DG 单元控制器计算得到无功下垂误差,通过积分环节进行无差调节,输出本单元的修正信号。

有功下垂仍采用传统下垂控制,无功下垂添加一个误差积分修正信号,以保证无功功率分配达到理想情况,控制方程为:

$$\omega = \omega^* - m(P - P^*) \quad (10)$$

$$U = U^* - n(Q - Q^*) - \frac{K_a}{s}(nQ - nQ_{avg}) \quad (11)$$

其中, K_a 为积分常数。由式(11)可知,当 $nQ > nQ_{avg}$ 时,积分修正信号使逆变器输出的参考电压 U 降低;根据线路功率传输式(4),当线路近似感性,无功功率大小与线路两端电压差成正比,即输出电压下降,线路两端电压差降低, DG 输出的无功功率降低,无功下垂量 nQ 亦降低,直至各 DG 无功下垂量 $nQ = nQ_{avg}$,则积分修正信号为零,达到稳态,反之亦然。

当负荷或输出功率发生波动时,该设计方案仍能保持稳定有效运行。负荷切换或变化会导致系统稳定运行点的改变,对此可通过合理设置积分常数

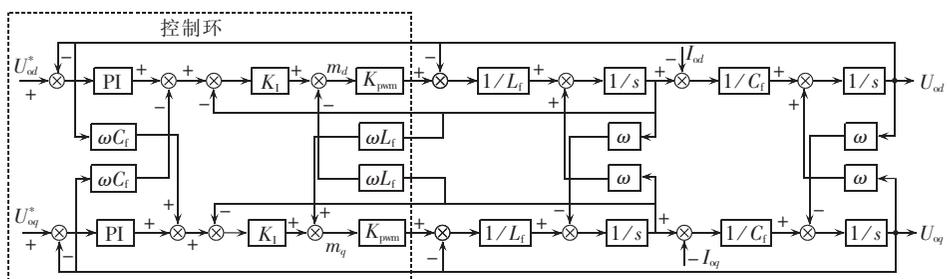


图 2 双环反馈控制结构

Fig.2 Structure of dual-loop feedback control

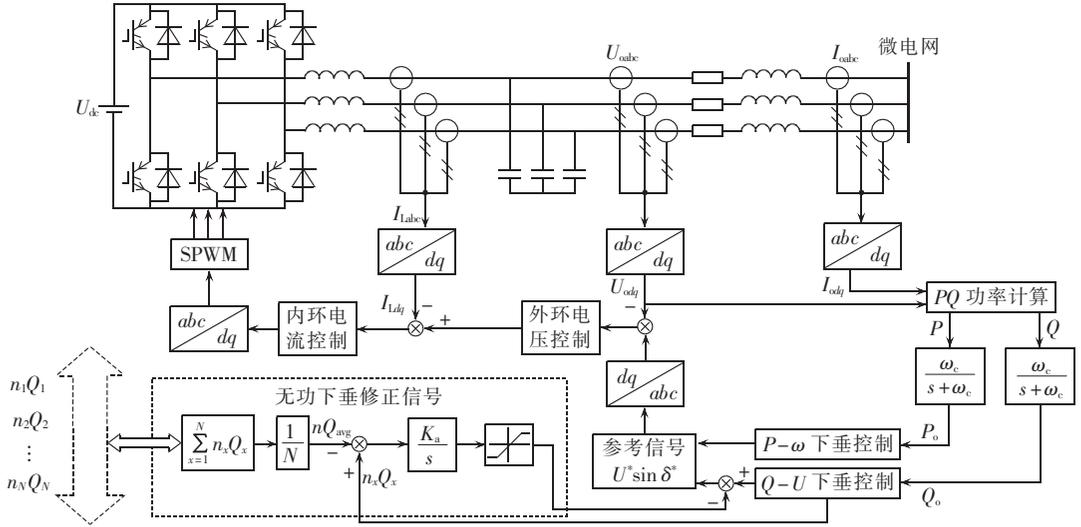


图 4 微源逆变器改进控制框图

Fig.4 Block diagram of improved DG inverter control

K_a 进行调节, K_a 越大, 系统无功分配的响应越快, 具体参数对系统稳定性的影响将在第 2.3 节小信号建模中进行分析。

2.2 并网同步控制器

为保证持续可靠的运行, 对关键负荷不间断供电, 微电网必须能够稳定工作在孤岛模式与并网模式下, 并在 2 种模式间平滑切换, 因此微电网孤岛模式下的并网同步控制具有较为重要的意义。

采用下垂控制的孤岛微电网并网控制思想与传统发电机及风机、光伏等新能源并网要求相同, 需 PCC 两端电压幅值、频率及相位一致。本文在上述改进后加入 $Q-U$ 下垂环节, 采用锁相环 (PLL) 技术对主网以及微电网 PCC 处电压相位进行检测, 对相位差进行 PI 调节后加入 $P-\omega$ 下垂环节。

电压幅值差 U_{diff} 与相位差 δ_{diff} 分别为:

$$U_{diff} = \sqrt{U_{g\alpha}^2 + U_{g\beta}^2} - \sqrt{U_{PCC\alpha}^2 + U_{PCC\beta}^2} \quad (12)$$

$$\delta_{diff} = \delta_g - \delta_{PCC} \quad (13)$$

其中, $U_{g\alpha}, U_{g\beta}, U_{PCC\alpha}, U_{PCC\beta}$ 分别为主网和微电网电压的 α, β 分量; δ_g, δ_{PCC} 分别为主网与微电网电压相位。相比于采用 dq 变换计算电压幅值, 仅采用 Clarke 变换简化了计算过程。同时, 对相位差值的计算直接采用 PLL 输出, 具体控制结构如图 5 所示。

在求得 U_{diff} 与 δ_{diff} 后, 对其进行 PI 调节, 调节控制器的输出分别为 DG 的电压幅值与相位补偿信号。通过图 6 中的并网同步控制器, 可保证 PCC 电压幅值、频率、相位与主网保持一致。采用该方法不会影响第 2.1 节中改进下垂控制的有效性, 加入该控制器后的下垂控制方程为:

$$\omega = \omega^* - m(P - P^*) + \left(K_{p1} + \frac{K_{i1}}{s} \right) \delta_{diff} \quad (14)$$

$$U = U^* - n(Q - Q^*) - \frac{K_a}{s} (nQ - nQ_{avg}) + \left(K_{p2} + \frac{K_{i2}}{s} \right) U_{diff} \quad (15)$$

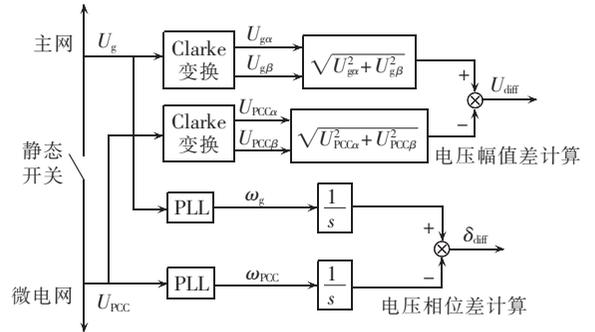


图 5 并网同步误差计算环节

Fig.5 Calculation of synchronization error for grid connection

与改进下垂控制数据采集通信相同, 并网同步过程也利用二级中央控制器采集 PCC 两端电压信号, 通过图 5 计算得出 U_{diff} 与 δ_{diff} , 将其传输至 DG 单元, 根据图 6 所示 DG 控制器对同步误差进行修正, 得到逆变器输出参考电压 U_{inv} 与参考角频率 ω_{inv} 。

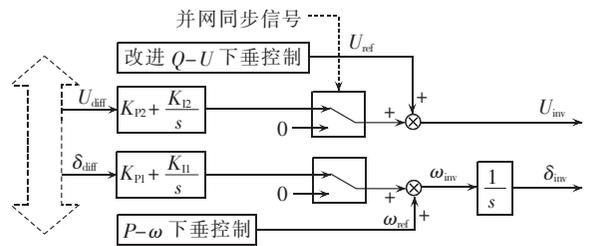


图 6 并网同步控制

Fig.6 Synchronization control for grid connection

2.3 稳定性分析

目前, 对传统 $P-\omega, Q-U$ 下垂控制小信号模型的讨论较多。本文针对提出的改进下垂与并网控制系统建立小信号模型, 对系统稳定性进行分析。

电力系统近似感性线路功率传输公式如式 (3)、(4) 所示, 其小信号模型为:

$$\Delta P_x = \frac{U_x U_p}{X_x} \cos \delta_x \Delta \delta_x + \frac{U_p}{X_x} \sin \delta_x \Delta U_x \quad (16)$$

$$\Delta Q_x = \frac{U_x U_p}{X_x} \sin \delta_x \Delta \delta_x + \frac{2U_x - U_p \cos \delta_x}{X_x} \Delta U_x \quad (17)$$

$$\text{令 } D_{p\delta} = \frac{U_x U_p}{X_x} \cos \delta_x, D_{pu} = \frac{U_p}{X_x} \sin \delta_x, D_{q\delta} = \frac{U_x U_p}{X_x} \sin \delta_x,$$

$$D_{qu} = \frac{2U_x - U_p \cos \delta_x}{X_x}, \text{则式(16)、(17)可用矩阵表示为:}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P_x \\ \Delta Q_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{p\delta} & D_{pu} \\ D_{q\delta} & D_{qu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_x \\ \Delta U_x \end{bmatrix} \quad (18)$$

又根据图 4 计算得出的有功功率 P_x 与无功功率 Q_x , 经截止频率为 ω_c 的低通滤波器得 P_{xo} 和 Q_{xo} , 其小信号模型为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{xo} \\ \Delta Q_{xo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\omega_c}{s + \omega_c} & 0 \\ 0 & \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_x \\ \Delta Q_x \end{bmatrix} \quad (19)$$

考虑如式(14)、(15)所示的并网同步的下垂方程, 以及 $\omega = s\delta$, 结合式(12)、(13), 其小信号模型为:

$$\begin{bmatrix} s + K_{p1} + \frac{K_{11}}{s} & 0 \\ 0 & 1 + K_{p2} + \frac{K_{12}}{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_x \\ \Delta U_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -m & 0 \\ 0 & -n - \frac{K_a}{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{xo} \\ \Delta Q_{xo} \end{bmatrix} \quad (20)$$

结合式(18) — (20), 可得关于 $\Delta \delta_x$ 的如下特征方程:

$$\Delta = As^5 + Bs^4 + Cs^3 + Ds^2 + Es + F \quad (21)$$

$$A = \tau^2(1 + K_{p2}) \quad (22)$$

$$B = \tau(1 + K_{p2})(1 + \tau K_{p1}) + \tau(\tau K_{12} + K_{p2} + nD_{qu} + 1) \quad (23)$$

$$C = \tau(K_{12} + K_a D_{qu}) + (1 + \tau K_{p1})(\tau K_{12} + K_{p2} + nD_{qu} + 1) + \tau(1 + K_{p2})(K_{p1} + \tau K_{11} + mD_{p\delta}) \quad (24)$$

$$D = (1 + \tau K_{p1})(K_{12} + K_a D_{qu}) + \tau K_{11}(1 + K_{p2}) + (K_{p1} + \tau K_{11} + mD_{p\delta})(\tau K_{12} + K_{p2} + nD_{qu} + 1) - mnD_{p\delta}D_{pu} \quad (25)$$

$$E = (K_{p1} + \tau K_{11} + mD_{p\delta})(K_{12} + K_a D_{qu}) + K_{11}(\tau K_{12} + K_{p2} + nD_{qu} + 1) - mK_a D_{q\delta}D_{pu} \quad (26)$$

$$F = K_{11}(K_{12} + K_a D_{qu}) \quad (27)$$

根据上述方程的特征根, 对系统稳定性进行分析, 为保证在小扰动情况下系统的稳定运行, 所有特征根的实部必须为负。

随下垂与并网控制参数 $K_a, K_{p1}, K_{11}, K_{p2}, K_{12}$ 变化的特征方程根轨迹如图 7 所示, 取 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ 为主导特征根, 其值变化对系统稳定性影响较大, 其中更靠近虚轴的 λ_1, λ_2 更为重要。对相关参数进行初始化, 分别调整 $K_a, K_{p1}, K_{11}, K_{p2}, K_{12}$, 研究其根轨迹变化。

在图 7(a) 中, λ_3, λ_4 的根轨迹受到下垂控制参数 K_a 的影响。随 K_a 的增加, 特征根远离虚轴, 但对 λ_1, λ_2 影响较小, 可知 K_a 的增加会提升系统稳定性。

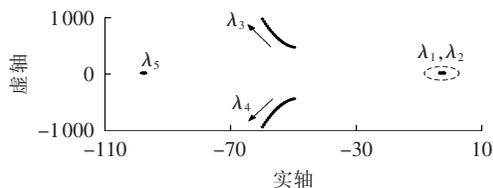
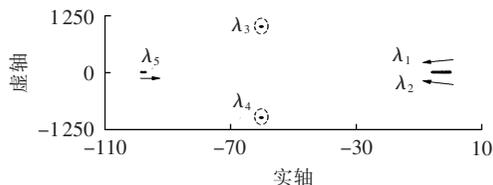
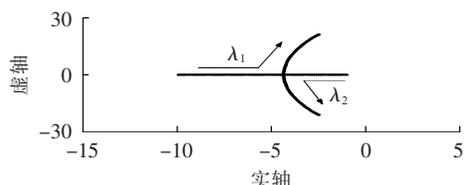
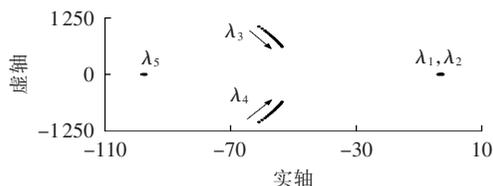
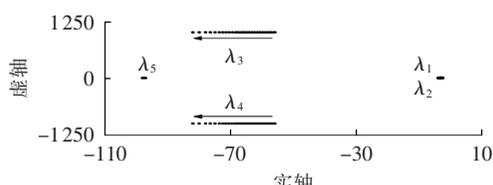
(a) $10 \leq K_a \leq 50$ (b) $1 \leq K_{p1} \leq 20$ (c) $10 \leq K_{11} \leq 200$ (d) $0.1 \leq K_{p2} \leq 2$ (e) $1 \leq K_{12} \leq 60$

图 7 控制系统根轨迹图

Fig.7 Root locus of control system

如图 7(b)、(c) 所示, 并网相位控制参数 K_{p1}, K_{11} 影响主导特征根 λ_1, λ_2 的根轨迹。随着 K_{p1} 的增加, 特征根远离虚轴, 振荡衰减更快。随着 K_{11} 增加, λ_1, λ_2 分别相向移动, 后变为一对共轭复数根, 因此 K_{11} 应设置为共轭根上一点, 但不应超过 100, 以免靠近虚轴, 降低暂态性能。

从图 7(d)、(e) 可以看出, 并网电压控制参数 K_{p2}, K_{12} 主要影响 λ_3, λ_4 的根轨迹。随着 K_{p2} 的增加, 特征根靠近虚轴, 因此 K_{p2} 取值不应超过 0.5。 K_{12} 的增加使 λ_3, λ_4 远离虚轴, 设置 $K_{12} \leq 10$, 可增加系统稳定性。同时注意到 λ_5 在各参数变化时基本保持不变, 其值本身也离虚轴较远, 因此对系统稳定性影响可以忽略。

3 仿真分析

在 MATLAB/Simulink 平台中搭建了含 2 台并

联逆变器的孤岛微电网模型,采用本文提出的改进下垂与并网控制策略进行仿真验证。微源与逆变器参数为:微源额定功率 P_n 为 8 kW、12 kW, $Q_n=0$; $L_f=1.3$ mH, $R_f=0.01$ Ω ; $C_f=1200$ μ F; 微源出口线路电阻 R_{line} 、微源出口线路电感 L_{line} 分别为 0.1 Ω 和 2 mH; 系统额定相电压有效值为 220 V、额定频率为 50 Hz。控制系统参数: $m=0.0003142$ rad/(W·s); n 为 0.0006 V/var、0.0003 V/var; 电压环比例增益 $k_{up}=5.328$, 电压环积分增益 $K_{ui}=216, K_{pi}=5, K_{ii}=50, K_{p2}=0.1, K_{i2}=10; \omega_c=125.7$ rad/s。

3.1 改进负荷分配控制效果

DG_1 额定有功为 8 kW, DG_2 额定有功为 12 kW, 同时采用 2 台参数相同的 LC 滤波装置进行谐波抑制。 DG 间的功率分配仿真结果见图 8(图中 P_1, P_2 和 Q_1, Q_2 分别为 DG_1, DG_2 的有功和无功, 后同), 在 $t=3$ s 前, 有功负荷 $P_{L1}=24$ kW, 无功负荷 $Q_{L1}=4.5$ kvar。微电网开始运行时采用传统下垂控制, 由图可见, DG_1 与

DG_2 的有功功率合理分配, 分别为 10 kW、14 kW。由表 1 中无功下垂系数可知, DG_2 无功容量为 DG_1 的 2 倍, 而 1 s 前二者无功功率相同, 未按容量精确分配。

在 $t=1$ s 时, 启动改进下垂控制, 由图 8(b) 可知, Q_1 下降, Q_2 上升, 分别为 1.5 kvar、3 kvar, 达到预期目标, 暂态过程平滑稳定, 对有功分配无影响。在 $t=3$ s 时, 有功、无功负荷分别增加到 $P_{L2}=28$ kW、 $Q_{L2}=6$ kvar, 改进分配控制仍然有效, DG_1 与 DG_2 的无功功率分别为 2 kvar、4 kvar, 且暂态过程良好。图 8(c)、(d) 为电压输出信号, 改进 $Q-U$ 下垂控制分别对 DG_1 与 DG_2 阻抗电压进行补偿, 消除输出及线路阻抗对无功分配的影响, 保证其有效性。

3.2 采用改进负荷控制的微电网并网同步效果

采用改进负荷控制的微电网并网同步仿真结果如图 9 所示。 $t=3$ s 前微电网运行于孤岛模式, 起始有功负荷 $P_{L1}=24$ kW, 无功负荷 $Q_{L1}=3$ kvar。可见有功合理分配, DG_1, DG_2 的有功分别为 10 kW、14 kW; 改进负荷控制依然有效, DG_1, DG_2 的无功分别为

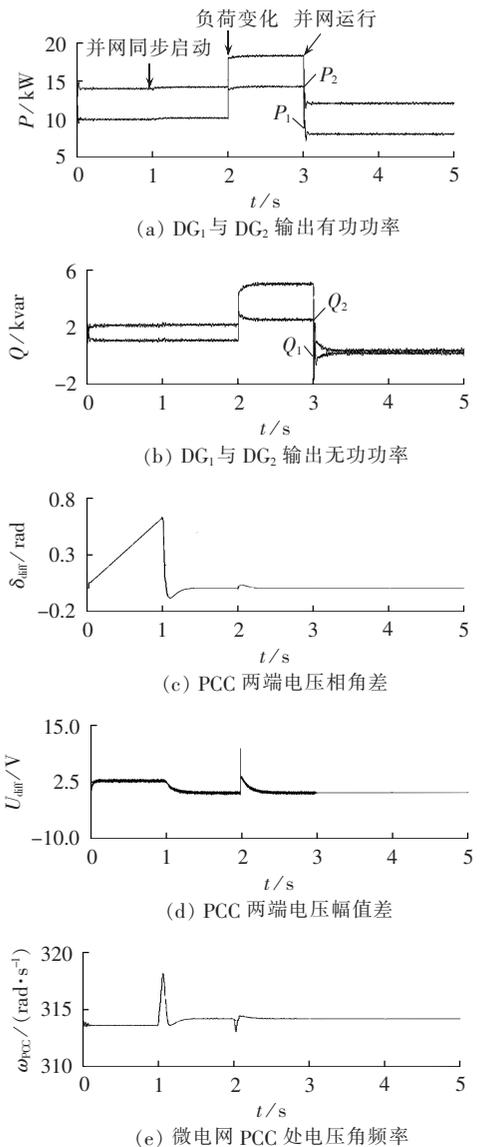
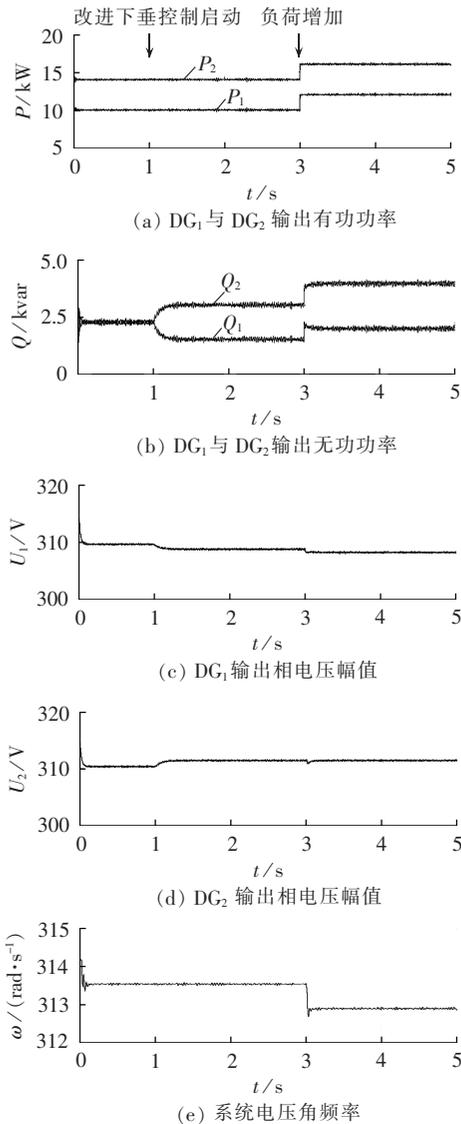


图 8 采用改进负荷分配控制策略后的仿真结果
Fig.8 Simulative results for proposed strategy

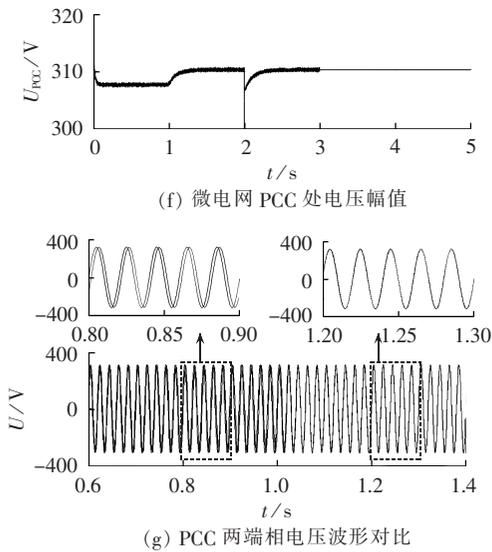


图 9 采用改进负荷控制策略的并网同步仿真结果
Fig.9 Simulative results of grid-connection synchronization with proposed strategy

1 kvar、2 kvar。

在 $t=1$ s 时并网同步控制器启动,由图 9(c)~(g) 可见, δ_{diff} 与 U_{diff} 开始恢复为零, ω_{PCC} 与 U_{PCC} 开始恢复至额定值, PCC 两端电压幅值、相位达到一致,表明微电网系统已达并网要求。当 $t=2$ s 时,负荷增加,有功、无功保持合理分配, δ_{diff} 与 U_{diff} 增加后仍变为零, ω_{PCC} 与 U_{PCC} 经短暂偏移后恢复额定值。 $t=3$ s 开关闭合,系统转入并网运行, DG₁ 与 DG₂ 有功功率变为额定值 8 kW、12 kW,无功功率趋近于零,其值为相应线路的无功损耗。至此,采用改进负荷分配策略的微电网并网同步控制结束,系统成功转入并网运行,控制效果良好,暂态过程平滑稳定。可见,系统运行工况改变后,各参量达到稳态的恢复时间均小于 0.5 s,具有良好的控制效果和灵活性。

为验证该系统并网控制效果,采用传统下垂控制进行并网仿真对比,并网控制器仍采用电压幅值相角的 PI 调节,相关控制参数设置参考上述算例。图 10(a)与图 9(b)对比可知, DG₁ 与 DG₂ 的无功功率并未精确分配,存在显著误差。同时,在 $t=1$ s 启动

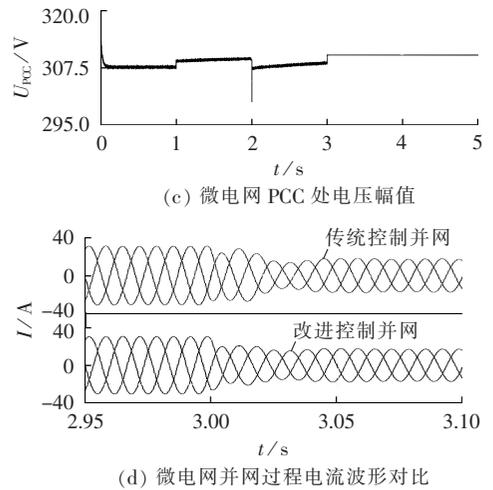
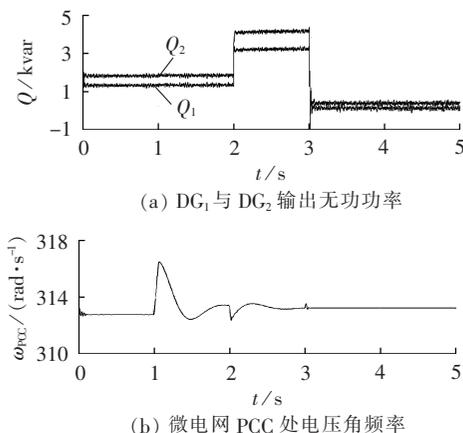


图 10 采用传统下垂控制策略的并网同步仿真结果
Fig.10 Simulative results of grid-connection synchronization with traditional droop control strategy

并网同步控制器及 $t=2$ s 负荷变化时,系统频率发生振荡,暂态过程较长, $t=3$ s 并网时 PCC 处电压与主网不一致。如图 10(d)所示,采用改进控制后 PCC 处并网电流波形更加稳定。

4 结论

本文提出一种微电网改进负荷分配策略,设计了并网同步控制器,并对系统稳定性进行分析。在三环下垂控制逆变器的基础上,针对无功功率分配问题,提出无功下垂平均因子 nQ_{avg} ,在 $Q-U$ 环中添加相应积分修正项,解决了无功功率分配不均问题。同时针对并网问题,设计了调节电压与相位同步的并网控制器,建立系统小信号等效模型,通过特征方程分析了改进下垂与并网控制参数对系统稳定性的影响,实现无功负荷分配的有效性,以及并网暂态过程的平滑稳定。仿真结果表明了本文所提出控制策略的有效性与可行性。

参考文献:

- [1] 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 Trans on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.
- [2] 时珊珊, 鲁宗相, 闵勇, 等. 微电网孤岛运行时的频率特性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 36-41.
SHI Shanshan, LU Zongxiang, MIN Yong, et al. Analysis on Electric frequency characteristics of islanded microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 36-41.
- [3] 吴志, 顾伟. 孤岛方式下基于多代理系统的微电网有功-频率控制[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(11): 57-61.
WU Zhi, GU Wei. Active power and frequency control of islanded microgrid based on multi-agent technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(11): 57-61.
- [4] MOHAMED Y A R I, RADWAN A A. Hierarchical control system for robust microgrid operation and seamless mode

- transfer in active distribution systems[J]. IEEE Trans on Smart Grid,2011,2(2):352-362.
- [5] JAEHONG K, GUERRERO J M, RODRIGUEZ P, et al. Mode adaptive droop control with virtual output impedances for an inverter-based flexible AC microgrid[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2011, 26(3):689-701.
- [6] KATIRAEI F, IRAVANI M R. Microgrid autonomous operation during and subsequent to islanding process[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(1):248-257.
- [7] 范元亮, 苗轶群, 江全元, 等. 基于下垂控制结构的微电网机组控制设计[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(6):125-130.
FAN Yuanliang, MIAO Yiqun, JIANG Quanyuan, et al. Generator control design based on droop control architecture for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6):125-130.
- [8] 王鹤, 李国庆. 含多种分布式电源的微电网控制策略[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5):19-23.
WANG He, LI Guoqing. Control strategy of microgrid with different DG types[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5):19-23.
- [9] 李福东, 吴敏. 微网孤岛模式下负荷分配的改进控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13):18-25.
LI Fudong, WU Min. An improved control strategy of load distribution in an autonomous microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13):18-25.
- [10] 程军照, 李澍森, 吴在军, 等. 微电网下垂控制中虚拟电抗的功率解耦机理分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7):27-32.
CHENG Junzhao, LI Shusen, WU Zaijun, et al. Analysis of power decoupling mechanism for droop control with virtual inductance in a Microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7):27-32.
- [11] BRABANDERE K, BOLSENS B, van den KEYBUS A, et al. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 22(4):1107-1115.
- [12] TULADHAR A, JIN H, UNGER T, et al. Control of parallel inverters in distributed AC power systems with consideration of line impedance effect[J]. IEEE Trans on Industrial Application, 2000, 36(1):131-138.
- [13] LEE T-C, CHU C-C, CHENG P-T. A new droop control method for the autonomous operation of distributed energy resource interface converters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2013, 28(4):1980-1993.
- [14] 张纯, 陈民铀, 王振存. 微网运行模式平滑切换的控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20):1-5.
ZHANG Chun, CHEN Minyou, WANG Zhencun. Study on control scheme for smooth transition of micro-grid operation modes[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20):1-5.
- [15] 陈新, 姬秋华, 刘飞. 基于微网主从结构的平滑切换控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2):163-170.
CHEN Xin, JI Qiu-hua, LIU Fei. Smooth transferring control method of microgrids based on master-slave configuration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2):163-170.
- [16] LEE C T, JIANG R-P, CHENG P-T. A grid synchronization method for droop-controlled distributed energy resource converters[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2013, 49(2):954-962.
- [17] 彭春华, 王立娜, 李云丰. 低压微电网三相逆变器功率耦合下垂控制策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3):28-33.
PENG Chunhua, WANG Lina, LI Yunfeng. Strategy of power-coupling droop control for three-phase inverter in low-voltage microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3):28-33.

作者简介:



郑连清

郑连清(1964—),男,浙江武义人,教授,博士,主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用;

庄琛(1991—),男,安徽宣城人,硕士研究生,主要研究方向为微电网运行与控制技术(E-mail:zhuangchen921@126.com);

马世强(1979—),男,山东临邑人,高级讲师,主要研究方向为电子电气控制;

王晓旭(1991—),女,吉林通化人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统的无功优化技术。

Improved load power allocation strategy for microgrid and grid-connection stability analysis

ZHENG Lianqing^{1,2}, ZHUANG Chen¹, MA Shiqiang², WANG Xiaoxu¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Xingxin Vocational and Technical College of the Xinjiang Production and Construction Corps., Urumqi 830074, China)

Abstract: Due to different influencing factors, such as the line impedance, the traditional droop control cannot be applied to allocate the power of islanded low-voltage microgrid according to the capacity of DG (Distributed Generation) unit. Furthermore, the voltage magnitude and frequency of islanded microgrid should be synchronized before grid-connection. The power allocation mechanism of parallel inverter is analyzed and an improved load power allocation strategy is proposed, which optimizes the power allocation within the microgrid by redesigning the $Q-U$ droop control loop with additional reactive power error integral term. A small-signal model of control system is built for the grid-connection synchronization of microgrid and the system stability of grid-connection synchronization control with the proposed load power allocation strategy is analyzed. Simulative results show that, with the proposed strategy, the reactive power can be reasonably allocated and the transient process of grid-connection is smooth and stable.

Key words: microgrid; load power allocation; electric load management; grid-connection; synchronization; stability; control; island; droop control; distributed power generation