

用于微网孤岛运行的新型功率控制方法

王旭斌, 李 鹏, 窦鹏冲, 周泽远

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要: 针对传统下垂控制受到微网线路阻抗特性等因素的影响难以实现功率精确分配的问题, 提出一种适用于低压微网孤岛运行模式下的新型有功-频率($P'-f$)和无功-电压微分($Q'-dU/dt$)功率控制策略。该策略基于电压幅值变化率(dU/dt)的电压补偿控制方法来实现无功功率精确分配, 同时可使系统电压保持在合理的稳定状态并保证相应的动态性能。小信号建模分析表明控制方程系数的匹配对系统瞬时响应影响较大, 合理的参数设计有利于提高系统动态性能。对孤岛模式下不同的系统状态进行仿真和对比分析, 验证了所提控制策略的有效性。

关键词: 微网; $Q'-dU/dt$ 控制; 电压控制; 补偿; 功率控制; 下垂控制

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.06.021

0 引言

在能源需求与环境保护的双重压力下, 可再生能源分布式发电逐渐受到关注, 包含分布式电源、负载、储能和能量变换装置等的微网研究很快成为国内外电气工程领域的最新前沿课题之一^[1-4]。与常规的分布式电源直接并网相比, 微网可灵活地将分布式电源与本地负荷组成一个整体, 通过柔性控制可以极大地降低分布式电源并网运行对电力系统的影响^[5-6]。分布式电源主要通过灵活可控的电力电子装置与大电网相连, 使得微网可以平滑过渡运行于并网和孤岛模式^[7-8]。如何控制微网中多个电力电子装置间的协调运行、实现微电源之间功率的合理分配是实现微网稳定运行的关键^[9-11]。当微网孤岛运行时, 分布式电源主要采用分散控制方式根据本地相关信息进行独立控制。该控制策略的优点是不需要相应的通信环节就可以实现分布式电源的即插即用, 灵活方便地组成微网。在分散控制中常采用的是功率下垂控制方法, 即有功-频率和无功-电压下垂控制^[12-14]。

鉴于分布式发电的复杂性和多变性以及下垂控制对并联运行的微电源之间等效输出阻抗的依赖, 按照传统的功率下垂控制方法很难实现功率的精确分配。为了解决此类问题, 目前国内外学者对传统下垂控制方法进行了改进。如在本地线路阻抗比很高的情况下采用反下垂控制^[15]; 当线路阻抗中的电阻和电感均不可以忽略时采用功率解耦的方法精确控制输出功率, 但这种方法的缺点是需要获得精确的线路参数^[16-17]; 针对包含多个分布式电源的微网在孤岛运行模式下的功率分配问题, 提出了一种下

垂特性和平均功率相结合的控制方法^[18]; 针对传统下垂特性控制方法的不足, 增加 $P-\delta$ 下垂控制修正和 $Q-U$ 下垂控制修正项, 可有效跟踪功率变化的动态特性^[19]。

本文针对孤岛运行模式下微网内部各个微电源之间的功率分配控制问题, 提出了一种适用于低压微网的新型有功-频率($P'-f$)和无功-电压微分($Q'-dU/dt$)下垂控制方法。其中, 为使改进控制策略可以应用于低压微网, 将基于平面旋转变换的虚拟功率方法应用于功率解耦。 $Q'-dU/dt$ 控制方法中, 通过控制电压幅值变化率 dU/dt 来实现无功功率的精确分配, 并提出基于 dU/dt 的电压补偿控制策略使电压保持在合理的稳定状态。最后通过实验仿真分析, 验证了本文所提出的控制策略的正确性和有效性。

1 传统功率下垂控制

图 1 所示为微电源互联结构示意图, 由 2 个微电源并联给负载供电, 等效孤岛模式下的简单微网。本文在此基础上对微电源输出功率特性进行研究, 微电源可通过低压线路与负载相连。

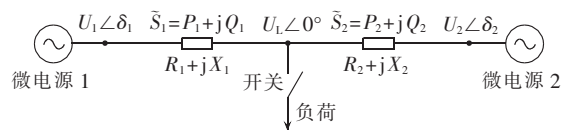


图 1 微电源互联结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of interconnected microsources

根据线路潮流公式, 微电源 i ($i=1, 2$) 出口处潮流可以写成:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_i &= P_i + jQ_i = U_i \angle \delta_i I_i^* = U_i \angle \delta_i \left(\frac{U_i \angle \delta_i - U_L \angle 0^\circ}{R_i + jX_i} \right)^* = \\ &= (U_i \cos \delta_i + j U_i \sin \delta_i) \left(\frac{U_i \cos \delta_i + j U_i \sin \delta_i - U_L}{R_i + jX_i} \right)^* \quad (1) \end{aligned}$$

收稿日期: 2013-05-07; 修回日期: 2014-02-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50977029); 河北省自然科学基金资助项目(E2013502074)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50977029) and the Natural Science Foundation of Hebei Province(E2013502074)

其中, $\tilde{S}_i$ 为微电源 i 出口处的视在功率; P_i 、 Q_i 分别为微电源 i 出口处的有功功率、无功功率; U_i 为微电源 i 出口处线电压有效值; δ_i 为微电源 i 出口处电压相角; U_L 为负荷处线电压有效值, 设负荷处的电压相角为 0° ; $R_i + jX_i$ 为微电源 i 所连线路阻抗; “*” 表示复数共轭。

由式(1)可得:

$$\begin{cases} P_i = \frac{U_i}{R_i^2 + X_i^2} [R_i(U_i - U_L \cos \delta_i) + X_i U_L \sin \delta_i] \\ Q_i = \frac{U_i}{R_i^2 + X_i^2} [-R_i U_L \sin \delta_i + X_i (U_i - U_L \cos \delta_i)] \end{cases} \quad (2)$$

进一步推算有:

$$\begin{cases} U_L \sin \delta_i = \frac{X_i P_i - R_i Q_i}{U_i} \\ U_i - U_L \cos \delta_i = \frac{R_i P_i + X_i Q_i}{U_i} \end{cases} \quad (3)$$

在高压输电线路中, 相角差主要是取决于有功功率, 电压幅值差主要是取决于无功功率。考虑到微电源出口侧电压幅值可以直接控制, 而其相角可以通过调节输出频率来实现, 因此对于高压输电线路存在有功-频率 ($P-f$)、无功-电压 ($Q-U$) 下垂特性, 依据该下垂特性构造式(4)即可实现电源之间的功率调节。

传统有功-频率、无功-电压下垂公式为:

$$\begin{cases} f_i = f_{\alpha} - k_{pi}(P_i - P_{\alpha}) \\ U_i = U_{\alpha} - k_{qi}(Q_i - Q_{\alpha}) \end{cases} \quad (4)$$

其中, f_{α} 、 U_{α} 分别为额定频率、额定线电压; P_{α} 、 Q_{α} 分别为额定频率、额定电压对应的有功功率、无功功率; k_{pi} 、 k_{qi} 分别为传统有功-频率、无功-电压的下垂系数。

由以上分析可以看出, 传统下垂控制仅考虑纯感性线路, 在 R/X 阻感比值较大的低压微网中受到局限, 不能有效地解决微电源之间功率的精确分配问题。

2 新型功率控制器设计

2.1 基于坐标变换的功率解耦

本文采用文献[15]中提出的虚拟功率解耦, 提出的功率下垂控制方法可以适用于低压微网。由于无法忽略电阻和电感中的任意一项, 频率、电压幅值的调节同有功功率和无功功率耦合在一起, 为此引入平面旋转变换矩阵 T , 将有功、无功进行解耦, 变换后的有功 P'_i 和无功 Q'_i 为:

$$\begin{bmatrix} P'_i \\ Q'_i \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} P_i \\ Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta_i & -\cos \delta_i \\ \cos \delta_i & \sin \delta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_i \\ Q_i \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_i} \begin{bmatrix} X_i & -R_i \\ R_i & X_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_i \\ Q_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

则由式(5)可得:

$$\begin{bmatrix} \delta_i \\ \Delta U_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X_i}{U_i U_L} & -\frac{R_i}{U_i U_L} \\ \frac{R_i}{U_i} & \frac{X_i}{U_i} \end{bmatrix} T T^{-1} \begin{bmatrix} P_i \\ Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_i}{U_i U_L} & 0 \\ 0 & \frac{Z_i}{U_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P'_i \\ Q'_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, $Z_i = R_i + jX_i$ 为微电源 i 的输出阻抗。

由式(6)可以看出, 相角差 δ_i 仅与虚拟有功功率 P'_i 存在线性关系, 电压幅值差 ΔU_i 仅与虚拟无功功率 Q'_i 存在线性关系。因此可建立适用于低压微网的虚拟有功-频率 ($P'-f$) 和虚拟无功-电压 ($Q'-U$) 下垂控制策略即可实现各微电源输出功率的有效调节。

2.2 改进的 $Q'-dU/dt$ 下垂控制

即使在低压微网中有功-频率下垂控制影响有功功率分配的主要因素还是功率角, 只要通过调节下垂特性使频率运行在合理范围, 有功功率就可得到有效的分配, 故本文主要讨论无功功率的精确分配问题。由于微电源间等效输出阻抗和下垂控制特性的影响, 传统功率下垂控制不能表示出逆变器输出无功和其电压幅值之间的动态实时关系, 不能使输出的无功功率经控制后达到期望值, 因此提出了基于 $Q'-dU/dt$ 的改进下垂控制。其中, 基于 dU/dt 的电压补偿控制策略可以使电压幅值保持在合理的稳定状态。

图 2 所示为 $Q'-dU/dt$ 下垂特性, 为提高控制动态响应加入微分项, 改进的无功-电压下垂控制表达式为:

$$\begin{aligned} \frac{dU_i}{dt} &= \frac{dU_{\alpha i}}{dt} - k_{qi}(Q'_i - Q'_{\alpha i}) - k_{dqi} \frac{dQ'_i}{dt} \\ U_i^* &= U_{\alpha i} + \int_t \frac{dU_i}{dt} d\sigma \end{aligned} \quad (7)$$

其中, k_{qi} 为 $Q'-dU/dt$ 下垂系数; $dU_{\alpha i}/dt$ 为 dU_i/dt 达到的额定值, 取为 0; σ 为调节时间 t 内具体的时

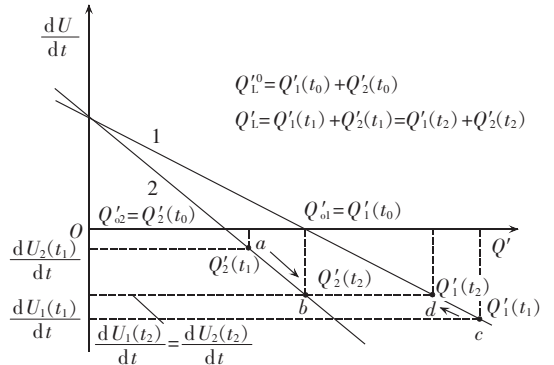


图 2 $Q'-dU/dt$ 控制的下垂特性

Fig.2 Droop characteristic of $Q'-dU/dt$ control

间点; Q'_{α} 为图 2 曲线中纵坐标为 $dU_i/dt=0$ 时对应的 Q' 值; U_i^* 为分布式电源逆变器的输出电压参考指令。

图 2 为图 1 中并联分布式电源的 $Q'-dU/dt$ 下垂特性。假设输电线路类型相同, 负荷与微电源 1 的距离比该负荷与微电源 2 的距离近, 初始负荷无功功率 Q_L^0 分配到微电源 1 和 2 的功率分别为 $Q'_1(t_0)$ 和 $Q'_2(t_0)$, 即 $Q_L^0=Q'_1(t_0)+Q'_2(t_0)$ 。当负荷无功功率由 Q_L^0 增加到 Q'_L 时, 因负荷与微电源 1 的距离较近, 所以微电源 1 输出的无功比微电源 2 输出的无功多, 即 $Q'_1(t_1)>Q'_2(t_1)$, 此时无功功率的分配很不理想; 通过 $Q'-dU/dt$ 下垂控制后, 微电源 1 和 2 输出的无功就稳定在点 b 和点 d , 此时 $Q'_L=Q'_1(t_2)+Q'_2(t_2)$ 。由于各微电源的 dU_{α}/dt 最终值都相等, 由式 (7) 可得:

$$k_{q1}(Q'_{\alpha 1}-Q'_1)=k_{q2}(Q'_{\alpha 2}-Q'_2)=\dots=k_{qi}(Q'_{\alpha i}-Q'_i) \quad (8)$$

在额定运行条件下无功功率的分配与下垂系数有关, 故通过选择合适的下垂系数 k_{qi} , 就可满足:

$$\frac{Q'_1}{Q'_{\alpha 1}}=\frac{Q'_2}{Q'_{\alpha 2}}=\dots=\frac{Q'_i}{Q'_{\alpha i}} \quad (9)$$

由式 (9) 知负荷无功功率在各微电源间得到了精确分配, 且不会受微电源间等效输出阻抗的影响。

由图 2 知, 所有微电源的额定电压微分值 dU_{α}/dt 最终的稳定值都相同, 但若 dU_{α}/dt 值不为 0 时则输出电压不稳定, 为使提出的改进控制策略不影响电压质量, 本文提出一种电压补偿控制方法使电压达到稳定状态。其控制机理可表述为:

$$\frac{dQ'_{\alpha}}{dt}=K_{Qes}\left(\frac{dU_{\alpha}}{dt}-\frac{dU_i}{dt}\right) \quad (10)$$

其中, K_{Qes} 为电压补偿增益。

由式 (10) 和图 3 知, 经 $Q'-dU/dt$ 下垂控制后, 系统运行于点 e (t_2 时刻), 但此时的 $dU_i(t_2)/dt \neq 0$, 即电压处于不稳定状态。因此需要采用电压补偿控制使 $dU_i(t_2)/dt$ 为 0, 即在图 3 中将 $Q'-dU/dt$ 下垂特性曲线向右移动使 $Q'_{\alpha}(t_3)=Q'_i(t_3)$ 、 $dU_i(t_3)/dt=dU_{\alpha}/dt=0$, 最终使输出电压达到稳定状态, 使系统由点 e 运行于点 f (t_3 时刻)。

因此, 本文提出的改进下垂控制表达式为式 (11)。

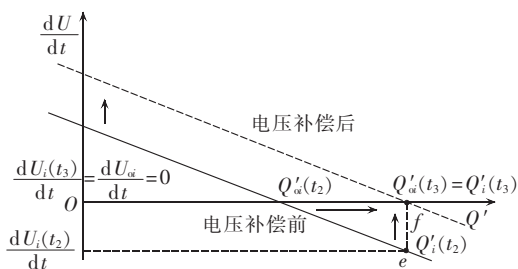


图 3 电压补偿控制原理图

Fig.3 Schematic diagram of voltage compensation control

$$\begin{cases} f_i^*=f_{\alpha i}-k_{pi}(P'_i-P'_{\alpha i})-k_{dpi}dP'_i/dt \\ dU_i/dt=dU_{\alpha}/dt-k_{qi}(Q'_i-Q'_{\alpha i})-k_{dqi}dQ'_i/dt \\ U_i^*=U_{\alpha}+\int_t(dU_i/dt)d\sigma \\ dQ'_{\alpha i}/dt=K_{Qes}(dU_{\alpha i}/dt-dU_i/dt) \end{cases} \quad (11)$$

图 4 和图 5 分别是改进的 $Q'-dU/dt$ 下垂控制器和功率控制器结构框图。图 5 中先由测得的微电源输出的瞬时电压和电流, 变换到 dqo 坐标, 计算得到微电源输出的瞬时有功 p 和瞬时无功 q 。然后通过低通滤波器得到其平均有功 P 和平均无功 Q , 再由坐标旋转得到虚拟有功功率 P' 和无功功率 Q' , 并与微电源的参考功率进行比较。最后通过改进下垂控制器, 得到微电源滤波器端口输出的参考角频率、参考相角和参考电压, 与三角载波进行比较, 计算开关时间, 驱动开关器件。使用平均功率进行调节可以使调节过程较为平稳。

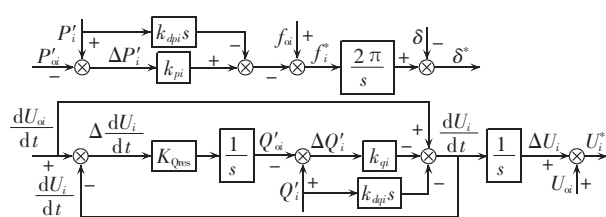


图 4 改进下垂控制器

Fig.4 Improved droop controller

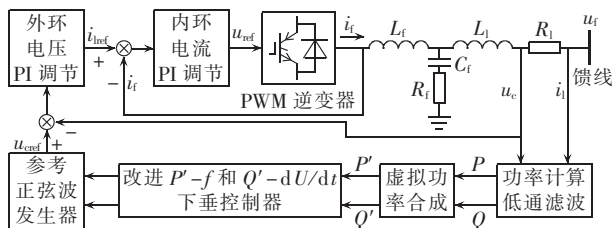


图 5 功率控制器结构框图

Fig.5 Block diagram of power controller

3 小信号建模与分析

3.1 小信号建模

为了分析系统的动态性能, 对系统进行小信号建模^[17]。式 (2) 中的 P_i 和 Q_i 都是将瞬态有功与无功功率经过低通滤波器而得到的, 所以式 (2) 的小信号扰动方程为 (设 $\theta \approx \pi/4$):

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\omega_c U_L}{(s+\omega_c) Z_i} (1+\delta_i) & \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\omega_c U_L}{(s+\omega_c) Z_i} U_i \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\omega_c U_L}{(s+\omega_c) Z_i} (1-\delta_i) & -\frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\omega_c U_L}{(s+\omega_c) Z_i} U_i \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta U_i \\ \Delta \delta_i \end{bmatrix} = G_i \begin{bmatrix} \Delta U_i \\ \Delta \delta_i \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中, ω_c 为低通滤波器截止频率, 这里取 10 rad/s。

将式(5)代入式(12),可以得到:

$$\begin{bmatrix} \Delta P'_i \\ \Delta Q'_i \end{bmatrix} = \mathbf{T} \mathbf{G}_i \begin{bmatrix} \Delta U_i \\ \Delta \delta_i \end{bmatrix} \quad (13)$$

式(6)表明, P'_i, Q'_i 分别仅与 δ_i, U_i 相关, 因此可以忽略 $\partial P'_i / \partial U_i$ 和 $\partial Q'_i / \partial \delta_i$, 得:

$$\begin{bmatrix} \Delta P'_i \\ \Delta Q'_i \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\omega_c U_L}{(s + \omega_c) Z_i} \times \begin{bmatrix} 0 & X_i U_i + R_i U_i \\ R_i + X_i + R_i \delta_i - X_i \delta_i & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_i \\ \Delta \delta_i \end{bmatrix} \quad (14)$$

将下垂控制表达式进行小扰动计算, 得到:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_i \\ \Delta \delta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{k_{qi} + k_{dqi}s}{s + k_q K_{Qres}} \\ -(k_{pi} + k_{dpi}s) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P'_i \\ \Delta Q'_i \end{bmatrix} \quad (15)$$

由式(12)~(15)可以得到控制方程:

$$A s^3 \Delta \delta_i + B s^2 \Delta \delta_i + C s \Delta \delta_i + D \Delta \delta_i = 0 \quad (16)$$

$$A = 2 Z_i (2 Z_i + n k_{dpi})$$

$$B = 2 Z_i (2 Z_i \omega_c + n k_{pi}) + (2 Z_i \omega_c + 2 Z_i k_{qi} K_{Qres} + m k_{dqi}) (2 Z_i \omega_c + n k_{dpi})$$

$$C = (2 Z_i \omega_c + 2 Z_i k_{qi} K_{Qres} + m k_{dqi}) (2 Z_i \omega_c + n k_{pi}) + (2 Z_i \omega_c k_{qi} K_{Qres} + m k_{pi}) (2 Z_i + n k_{dpi})$$

$$D = (2 Z_i \omega_c k_{qi} K_{Qres} + m k_{qi}) (2 Z_i \omega_c + n k_{pi})$$

$$m = \sqrt{2} \omega_c U_L (R_i + X_i + R_i \delta_i - X_i \delta_i)$$

$$n = \sqrt{2} \omega_c U_L (R_i + X_i)$$

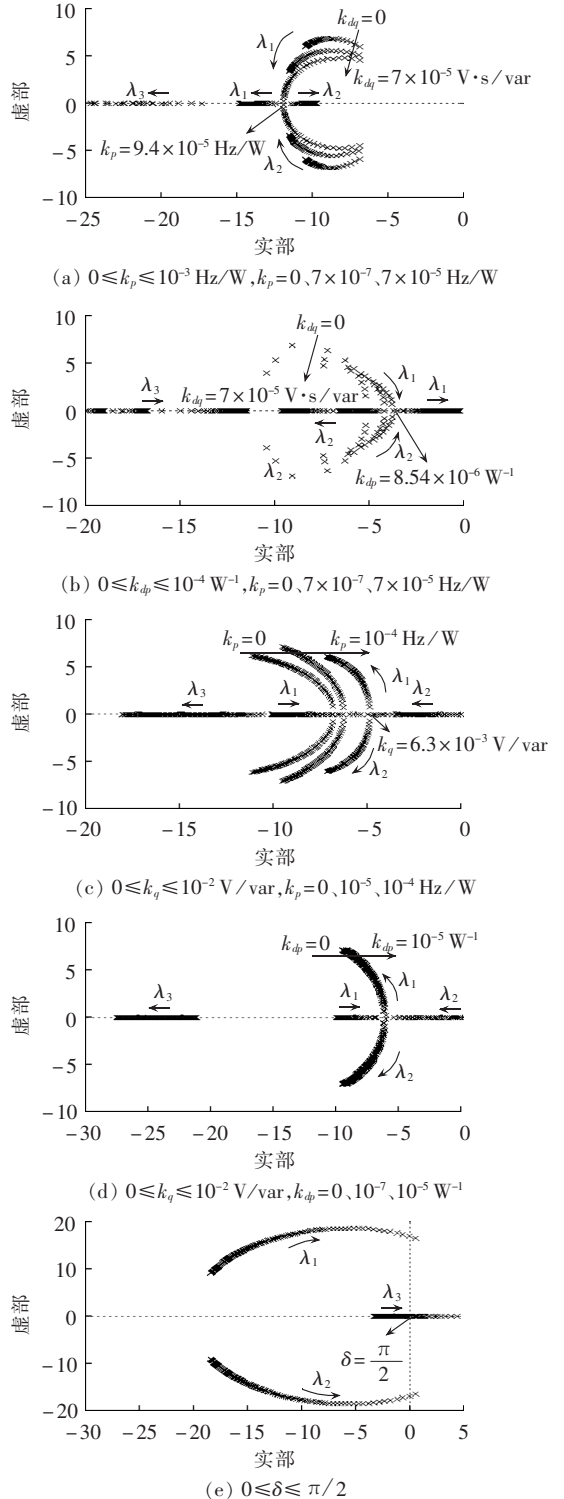
3.2 小信号建模分析

逆变器的电气参数如下: 连线阻抗 $Z = 0.2392 \Omega$, 输出侧电压 $U = 381.5 \text{ V}$, 电压初始相角 $\delta = 1.15^\circ$, 负荷侧电压 $U_L = 380 \text{ V}$, 稳态下垂系数 $k_p = 10^{-5} \text{ Hz/W}$, 瞬态下垂系数 $k_{dp} = 1.7 \times 10^{-7} \text{ W}^{-1}$, 稳态下垂系数 $k_q = 9.4 \times 10^{-4} \text{ V/var}$, 瞬态下垂系数 $k_{dq} = 5.3 \times 10^{-7} \text{ V} \cdot \text{s/var}$, 电压补偿增益 $K_{Qres} = 1237.5$ 。将参数代入控制方程, 通过求解该式的根, 分析改进下垂控制法中的系数变化对于系统稳定性与动态性能的影响。

下垂控制参数 k_p, k_{dp}, k_q, k_{dq} 和 K_{Qres} 的选择匹配能保持系统稳定运行, 同时提高系统的动态性能。根据逆变器参数, 由式(16)特征根的根轨迹图可以讨论这 5 个参数的选取, 并考虑初始相位角 δ 对系统稳定性的影响, 结果如图 6 所示。

如图 6(a) 所示, 当 $k_{dq} = 7 \times 10^{-5} \text{ V} \cdot \text{s/var}$, $0 \leq k_p \leq 9.4 \times 10^{-5} \text{ Hz/W}$ 时, 一对共轭根 λ_1 和 λ_2 逐渐向负实轴靠近; 但当 $k_p > 9.4 \times 10^{-5} \text{ Hz/W}$ 时, λ_1 和 λ_2 移动到负实轴上并向相反方向移动; $0 \leq k_p \leq 10^{-3} \text{ Hz/W}$ 时, 特征根 λ_3 一直处于负实轴远离虚轴移动; 当 $0 \leq k_{dq} \leq 7 \times 10^{-5} \text{ V} \cdot \text{s/var}$ 时, 3 个特征根变化幅度较小。由图 6(b) 可知, 较图 6(a) 不同的是, 共轭根 λ_1 和 λ_2 的变化方向由逐渐靠近虚轴方向接近负实轴, 而特征根 λ_3 则是靠近虚轴方向移动。

由图 6(a)、(b) 的分析知, k_p 和 k_{dp} 的变化对特征根分布影响较大, 同时考虑 k_{dq} 作用时对特征根影响相对较小。图 6(c)、(d) 主要分析 k_q 变化对特征根分布的影响, 并考虑有功下垂系数 k_p 和 k_{dp} 对其的影响。图 6(c) 中, 当 $k_p = 10^{-4} \text{ Hz/W}$, $0 \leq k_q \leq 6.3 \times 10^{-3} \text{ V/var}$ 时, 特征根 λ_1 和 λ_2 都会从实轴按照箭头方向转移到虚轴, 成为一对共轭根, 此时系统的动态性能增加; 当 $0 \leq k_p \leq 10^{-4} \text{ Hz/W}$ 时对特征根分布影响较大; 由图 6(d) 知, k_{dq} 变化时特征根均有较大变化。



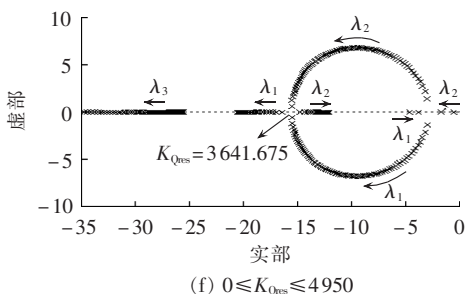


图 6 逆变器参数变化时的小信号模型根轨迹
Fig.6 Root locus of small signal model when inverter parameters changes

图 6(e)、(f)主要是分析初始相位角 δ 和电压补偿增益 K_{Qres} 对系统性能的影响。在图 6(e)中当 δ 变化时可明显分辨系统稳定性,即当 δ 增加到 $\pi/2$ 附近时特征根进入不稳定区域。由图 6(f)知,当 $0 \leq K_{Qres} \leq 3641.715$ 时,刚开始时特征根 λ_1 和 λ_2 就由负实轴按箭头方向转移到虚轴成为共轭根,系统动态性能得到增加;当 $3641.715 \leq K_{Qres} \leq 4950$ 时,共轭根 λ_1 和 λ_2 又移动到负实轴;特征根 λ_3 向远离原点方向缓慢移动。

由上述方法分析可知, k_{dq} 对系统的动态性能的影响最小,对于一定变化范围的 k_p 和 k_{dp} 对应的根轨迹变化影响较小; k_{dp} 取不同值时对一定范围变化的 k_q 对应的根轨迹变化影响也较小,而 k_p 取不同值时 k_q 对应的根轨迹变化影响较大,因此可以最先设定 k_{dq} 。 k_p 、 k_{dp} 和 k_q 的变化可以显著地影响系统特征根的分布。 K_{Qres} 的选择应考虑在提高电压补偿动态性能的同时减小系统的振荡。综合以上分析, k_p 、 k_{dp} 、 k_q 、 k_{dq} 和 K_{Qres} 数值设定如上文所述。

4 仿真结果与分析

为验证所提出改进下垂功率控制方法的正确性和有效性,根据如图 7 所示的微电源互联系统在 MATLAB/Simulink 平台进行了仿真分析,验证所提出控制策略的有效性。

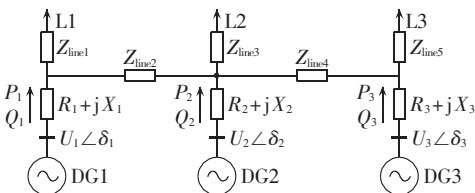


图 7 微网网络拓扑结构图
Fig.7 Topology of microgrid

系统的频率为 50 Hz,系统电压为 380 V,传输线路以阻性为主,均为 $Z_{line} = 2 + j0.05 \Omega$;DG 输出阻抗 $R_1 + jX_1 = 0.67 + j0.18 \Omega$, $R_2 + jX_2 = 1 + j0.4 \Omega$, $R_3 + jX_3 = 0.75 + j0.31 \Omega$;负荷参数 L1 为 1333 W 和 666 var, L2 为 666 W 和 333 var, L3 为 2000 W 和 2000

var;输出滤波器参数,滤波电感 $L_f = 3 \text{ mH}$,滤波电容 $C_f = 1500 \mu\text{H}$ 。下垂控制参数设置如表 1 所示,表中算例 1、2 的 3 个微电源参数均相同。

表 1 下垂控制仿真参数表
Tab.1 Coefficients for droop control simulation

下垂控制方式	下垂系数	算例 1、2	算例 3(DG1,DG2,DG3)
$P^*-f/P-f$ 控制	$k_p/(\text{Hz}\cdot\text{W}^{-1})$	10^{-5}	$10^{-5}, 2\times 10^{-5}, 1.5\times 10^{-5}$
	k_{dp}/W^{-1}	1.7×10^{-7}	$1.7\times 10^{-7}, 3.4\times 10^{-7}, 2.55\times 10^{-7}$
	P_o/W	2000	2000, 4000, 3000
Q^*-U 控制	$k_q/(\text{V}\cdot\text{var}^{-1})$	1.88×10^{-4}	$1.88\times 10^{-4}, 3.76\times 10^{-4}, 2.8\times 10^{-4}$
	$k_{dq}/(\text{V}\cdot\text{s}\cdot\text{var}^{-1})$	1.06×10^{-7}	$1.06\times 10^{-7}, 2.12\times 10^{-7}, 1.6\times 10^{-7}$
	Q_o/var	0	0/0/0
Q^*-dU/dt 控制	$k_q/(\text{V}\cdot\text{var}^{-1})$	9.4×10^{-4}	$9.4\times 10^{-4}, 18.8\times 10^{-4}, 14.1\times 10^{-4}$
	$k_{dq}/(\text{V}\cdot\text{s}\cdot\text{var}^{-1})$	5.3×10^{-7}	$5.3\times 10^{-7}, 10.6\times 10^{-7}, 7.95\times 10^{-7}$
	K_{Qres}	1237.5	825, 1650, 1237
	Q_o/var	0	0, 0, 0
	U_o/V	380	380, 380, 380

4.1 算例 1

在该算例中通过设置不同的线路阻抗来验证改进下垂控制的性能。微电源 DG1、DG2 和 DG3 的容量此时相同,控制器的参数设置见表 1,系统在 0.5 s 时控制策略由传统下垂控制切换为改进的下垂控制策略。由图 8 说明,即使微网并联系统的线路阻抗不一致,系统在 0.5 s 后无功功率的分配较传统下垂控制也得到明显优化;改进下垂控制后的电压水平得到提高,更接近系统要求电压 380 V;由图 8(c)知改进下垂控制后的电压变化率 DG2 较 DG1 和 DG3 大,这使得尽管在 DG2 连接阻抗较 DG1 和 DG3 都大的条件下,也可以让 DG2 输出的无功功率增大进而使系统无功功率分配效果得到改善。电压微分值最终因电压补偿控制策略调节无功初始值 Q_o 而让其达到理想值 0,使输出电压达到稳定状态;图 8(e)和 (f)说明通过坐标变换后调节下垂系数有功功率就可

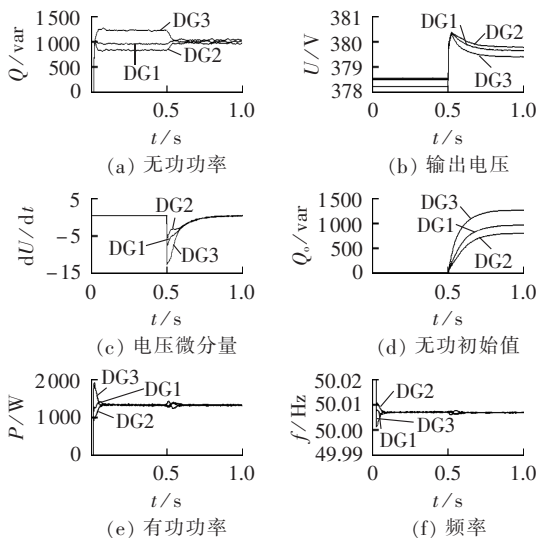


图 8 算例 1 功率控制仿真结果

Fig.8 Simulative results of power control,case 1

得到精确分配且频率保持恒定。

4.2 算例 2

在该算例中考虑极端情况, DG1 未通过输出阻抗而是直接和负荷相连接, 即 $R_1 + jX_1 = 0 + j0 \Omega$, 其他参数设置同算例 1。由图 9 可知, 在该极端情况下, 采用传统下垂控制时不仅出现功率分配严重失衡且 DG2 和 DG3 输出功率会出现负值, 即出现环流现象, 但经过改进下垂控制后 DG2 和 DG3 输出功率转为正值, 有效抑制了环流并且使无功功率的分配得到明显改善; 图 9(c) 说明通过电压补偿控制策略调节无功初始值 Q_{oi} 使微电源的电压变化率转为正值, 即通过调节微电源端电压上升使其输出的无功功率送至负荷侧, 图 9(b) 中经过改进下垂控制后电压质量依然保持在较高水平。

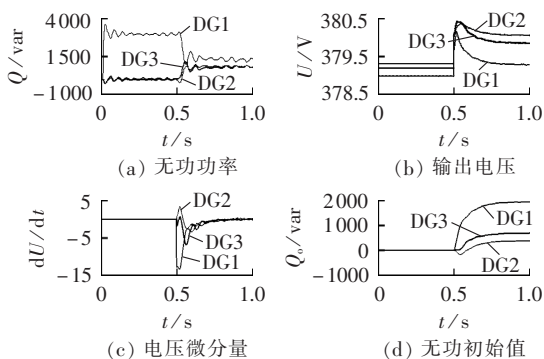


图 9 算例 2 功率控制仿真结果

Fig.9 Simulative results of power control, case 2

4.3 算例 3

在该算例中通过考虑各微电源容量和线路阻抗均不同的条件下, 验证所提出控制策略的有效性, 同算例 2 设置 $R_1 + jX_1 = 0 + j0 \Omega$, 其他参数设置见表 1。由图 10 可知, 在极端情况下通过改进下垂控制使微电源并联系统无功分配效果明显改善, 使无功功率可根据微电源容量成一定比例, 且有效消除了无功环流, 同时控制电压值在允许范围内。

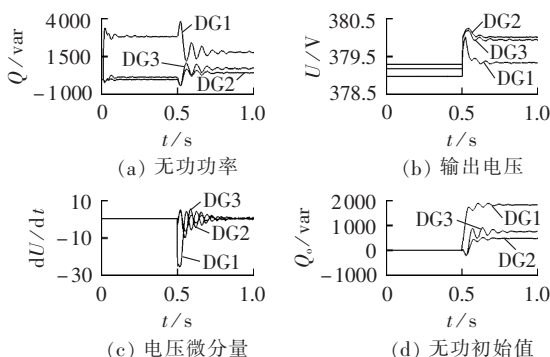


图 10 算例 3 功率控制仿真结果

Fig.10 Simulative results of power control, case 3

为定量分析经过改进下垂控制后无功功率分配性能, 引入无功功率分配误差, 其计算公式如下:

$$Q_{error,i} = \frac{Q_i - Q_i^*}{Q_i^*} \times 100\%, \quad Q_i^* = \frac{Q_{Ri}}{\sum_{i=1}^n Q_{Ri}} Q_L \quad (17)$$

$$e_{Q12} = \left| \frac{Q_1}{Q_1^*} - \frac{Q_2}{Q_2^*} \right| \times 100\%$$

由式(17)计算算例 1、2 和 3 经传统下垂和改进下垂控制后的无功功率分配误差, 计算结果如图 11、12 所示。图 11 中各算例左侧部分为传统下垂控制引起的误差, 右侧为改进下垂控制后的无功分配误差, 则知当采用改进下垂控制时无功功率分配的误差相对传统下垂控制有了很大改善, 这也说明了改进下垂控制方法的有效性。图 12 表示并联系统中线路阻抗比 Z_1/Z_2 变化时 2 种控制方法系统无功功率分配误差 e_{Q12} 比较曲线, 由图表明改进下垂控制方法相比传统下垂方法能有效克服因线路阻抗不匹配所引起的分配误差。

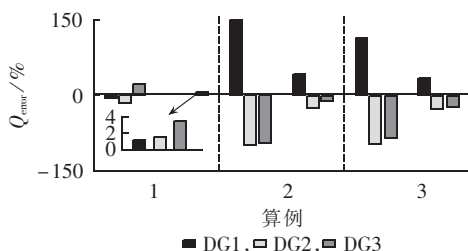
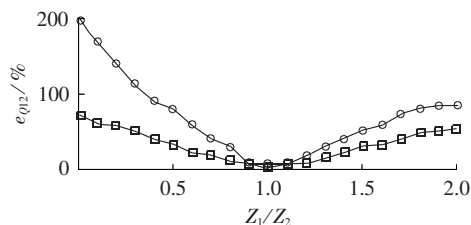
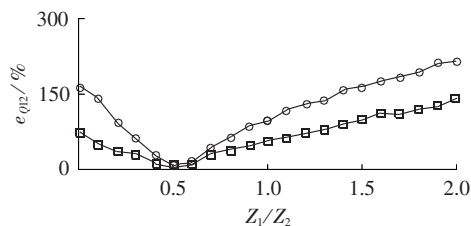


图 11 微电源无功功率分配误差

Fig.11 Errors of microsource reactive power assignment



(a) 微电源 1、2 容量相同



(b) 微电源 1 容量为微电源 2 容量的 2 倍

—○— 传统下垂控制, —□— 改进下垂控制

图 12 系统不同线路阻抗比无功功率分配误差

Fig.12 Errors of reactive power assignment for different line impedance ratios

5 结论

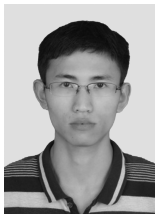
本文针对微网孤岛运行模式下的功率分配问题, 提出一种新型有功-频率和无功-电压微分下垂控制方法, 同时采用基于坐标变换的功率解耦使该方法可适用于低压微网。从理论上分析了控制参数

对于动态性能的影响,并由此确定其参数选择方法。通过选择系统不同条件进行仿真,并传统下垂控制方法在线路阻抗不匹配、微电源容量不同情况下进行对比,结果表明该方法在一般甚至极端条件下均可实现无功功率的精确分配,使电压保持在合理的稳定状态。

参考文献:

- [1] 余贻鑫,栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报,2009,29(34):1-8.
YU Yixin,LUAN Wenpeng. Smart grid and its implementations[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(34):1-8.
- [2] MOSLEHI K,KUMAR R. A reliability perspective of the smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2010,1(1):57-64.
- [3] 唐西胜,邓卫,李宁宁,等. 基于储能的可再生能源微网运行控制技术[J]. 电力自动化设备,2012,32(3):99-103.
TANG Xisheng,DENG Wei,LI Ningning,et al. Energy storage-based renewable energy micro-grid operation control technology[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(3):99-103.
- [4] 李鹏,王成山,黄碧斌,等. 分布式发电微网系统暂态时域仿真方法研究——(三)算例实现与仿真验证[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):35-43.
LI Peng,WANG Chengshan,HUANG Bibin,et al. Methodology of transient simulation in time domain for DG and microgrid(3): case study and validation[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(4):35-43.
- [5] 丁明,张颖媛,茆美琴. 微网研究中的关键技术[J]. 电网技术,2009,33(11):6-11.
DING Ming,ZHANG Yingyuan,MAO Meiqin. Key technologies for microgrids being researched[J]. Power System Technology,2009,33(11):6-11.
- [6] 王成山,肖朝霞,王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化,2008,32(7):98-103.
WANG Chengshan,XIAO Zhaoxia,WANG Shouxiang. Synthetic control and analysis of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(7):98-103.
- [7] 郑竞宏,王燕廷,李兴旺,等. 微电网平滑切换控制方法及策略[J]. 电力系统自动化,2011,35(18):17-24.
ZHENG Jinghong,WANG Yanting,LI Xingwang,et al. Control methods and strategies of microgrid smooth switchover[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(18):17-24.
- [8] 黄伟,孙昶辉,吴子平,等. 含分布式发电系统的微网技术研究综述[J]. 电网技术,2009,33(9):14-18.
HUANG Wei,SUN Changhui,WU Ziping,et al. A review on microgrid technology containing distributed generation system[J]. Power System Technology,2009,33(9):14-18.
- [9] KATIRAEI F,IRAVANI M R. Power management strategies for a micro-grid with multiple distributed generation units[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2006,21(4):1821-1831.
- [10] GUERRERO J,de VICUNA L,MIRET J,et al. Output impedance performance for parallel operation of UPS inverters using wireless and average current-sharing controllers[C]//IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference. Aachen,Germany:IEEE,2004:2482-2488.
- [11] 姜世公,王卫,刘桂花,等. 微网孤岛运行条件下基于导纳域的稳定性研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):19-25.
JIANG Shigong,WANG Wei,LIU Guihua,et al. Admittance specification stability of islanded microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(5):19-25.
- [12] 张尧,马皓,雷彪,等. 基于下垂特性控制的无互联线逆变器并联动态性能分析[J]. 中国电机工程学报,2009,29(3):42-48.
ZHANG Yao,MA Hao,LEI Biao,et al. Analysis of dynamic performance for parallel operation wire interconnections[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(3):42-48.
- [13] 林新春,段善旭,康勇,等. 基于下垂特性控制的无互联线并联UPS建模与稳定性分析[J]. 中国电机工程学报,2004,24(2):33-38.
LIN Xinchun,DUAN Shanxu,KANG Yong,et al. Modeling and stability analysis for parallel operation of UPS with no control interconnection basing on droop characteristic[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(2):33-38.
- [14] ENGLER A,SOULTANIS N. Droop control in LV-grids[C]//2005 International Conference on Future Power Systems. Amsterdam,Netherlands:IEEE,2005:1-6.
- [15] de BRABANDERE K,BOLSENS B,van den KEYBUS J,et al. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2007,22(4):1107-1115.
- [16] LEE C T,HSU C W,CHENG P T. A low-voltage ride-through technique for grid-connected converters of distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2011,47(4):1821-1832.
- [17] MARWALI M N,DAI M,KEYHANI A. Stability analysis of load sharing control for distributed generation systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2007,22(3):737-745.
- [18] 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.
- [19] 高范强,王平,李耀华,等. 基于时变相量小信号模型的逆变器并联控制系统分析与设计[J]. 中国电机工程学报,2011,31(33):75-84.
GAO Fanqiang,WANG Ping,LI Yaohua,et al. Analysis and design of for paralleled inverter system based on the small signal model using time-varying phasor[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(33):75-84.

作者简介:



王旭斌

王旭斌(1988-),男,甘肃天水人,硕士研究生,研究方向为新能源并网发电与微网新技术(E-mail:wx_b_great@163.com);

李鹏(1965-),男,河北保定人,教授,IEEE Senior Member,博士,研究方向为电力系统分析与控制、新能源并网发电与微网新技术;

窦鹏冲(1988-),男,河北石家庄人,硕士研究生,研究方向为新能源并网发电与微网新技术;

周泽远(1989-),男,江苏扬州人,硕士研究生,研究方向为新能源并网发电与微网新技术。

(下转第134页 continued on page 134)

former condition assessment based on AHP grey fixed weight clustering[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6):104-107, 133.

- [19] 周念成, 池源, 王强钢, 等. 并网光伏电站在线监测与状态评估系统[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(10):6-11.

ZHOU Niancheng, CHI Yuan, WANG Qianggang, et al. On line monitoring and state evaluation system for grid connected PV generation station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10):6-11.

作者简介:



巫伟南

巫伟南(1989-), 男, 广东揭阳人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制
(E-mail: vigor_wu@whu.edu.cn);

杨 军(1977-), 男, 湖北武汉人, 副教授, 博士, 研究方向为电力系统保护与控制
(E-mail: JYang@whu.edu.cn)。

Power grid risk assessment system considering characteristics of transmission line failure

WU Weinan¹, YANG Jun¹, HU Wenping², ZENG Zhili¹, YU Teng kai², LIU Pei¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: The random and fuzzy transmission line failure impacts severely on the operational safety of power grid, for which, a comprehensive risk assessment system with the consideration of its characteristics is proposed. A transmission line failure probability prediction model is built based on the cloud model, which generates the normally distributed clouds according to the data of transmission line state assessment to predict its failure probability. Based on utility theory, a comprehensive risk assessment index system is built for power grid, which includes the general load loss, potential cascading failure, voltage limit violation and system stability, which is used to scan the operational weakness of power grid. With a real power grid as a study case, the effectiveness and practicality of the proposed assessment system are verified.

Key words: electric power systems; electric power transmission; forecasting; cloud prediction model; utility theory; risk assessment; analytic hierarchy process; entropy method; failure analysis

(上接第 128 页 continued from page 128)

Power control method for autonomous microgrid

WANG Xubin, LI Peng, DOU Pengchong, ZHOU Zeyuan

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Traditional droop control can hardly realize the accurate power assignment in microgrid because of some influencing factors, such as the characteristics of line impedance, for which, a strategy of active power-frequency($P'-f$) and reactive power-voltage differential($Q'-dU/dt$) power control is proposed. The voltage compensation control method based on voltage amplitude variation rate(dU/dt) is applied to realize the accurate reactive power assignment while the system voltage is maintained stable in a certain level and the dynamic performance is insured. The small signal model analysis shows that, the instantaneous system response is greatly affected by the coefficients of control equation and the rational parameter design improves the dynamic performance of system. Different system states of autonomous microgrid are simulated and analyzed, which verifies the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: microgrid; $Q'-dU/dt$ control; voltage control; compensation; power control; droop control