DOI：10.3969/j.issn.1000-1026.2012.07.006

微电网下垂控制中虚拟电抗的功率解耦机理分析

程军照[1]，李澍森[1]，吴在军[2]，陈江波[1]
（1. 国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司（武汉院区），湖北省武汉市 430074；
2. 东南大学电气工程学院，江苏省南京市 210096）

摘要：下垂控制在逆变器型微电网控制中得到了广泛应用。当线路呈阻性时，有功功率和无功功率存在较强耦合，影响了下垂控制的性能。目前提出了两大类解决方法：一类方法通过控制参数的选取使逆变器的等效输出阻抗在基频段呈感性，但该方法的输出阻抗受制于控制参数并且存在较大缺陷；另一类方法用逆变器输出电流和虚拟阻抗计算电压降，从指令电压中减去该电压降，达到模拟实际阻抗的作用，效果更优，但对其机理缺乏阐述，且存在逆变器输出电压偏差问题。文中分析了上述两大类方法的缺陷，探讨了一种虚拟电抗与虚拟发电机相结合的下垂控制方法，从理论上阐明其可行性并给出了具体实现方法。MATLAB 仿真表明了所提出方法的有效性。

关键词：微电网；逆变器；独立运行；下垂控制；虚拟电抗；功率解耦

0 引言

微电网是由小型分布式电源（DG）、储能设备及负荷组成的有机整体，具有并网和独立 2 种运行模式，是国内外的研究热点[1]。微电网的控制方式可分为主从式和对等式两大类。前者利用全局信息实现控制，对通信的要求较高；后者利用本地信息实现控制，鲁棒性较好，有利于实现即插即用，受到了广泛关注[2-4]。

对等控制的一个重要手段是将传统电网中的功率下垂特性引入到微电网中，利用 P-f 和 Q-V 下垂特性，实现对有功功率和无功功率的无互联线控制。在感性线路环境中，下垂控制可取得较好效果，而微电网线路多呈阻性，因而影响了下垂控制的效果。在 DG 与并网点之间加入隔离变压器，虽然可以获得较大的 X/R 比值，但要增加硬件投资，因此更为实际的办法是改进控制策略。

文献[5]采用 P-V 和 Q-f 下垂控制，但这种控制与传统同步机不兼容，且不适用于既有阻性线路又有感性线路的微电网[6]（部分 DG 可能有输出变压器，等效线路阻抗为感性）。文献[7]提出了对功率进行坐标变换的方法，但要利用线路 X/R 比值信息，有时难以获取。文献[8]引入虚拟电阻，利用 P-V 和 Q-f 下垂控制抑制 DG 并联运行时的环流。文献[9-10]利用虚拟电阻抑制逆变器并联运行时的环流，其虚拟电阻的产生原理和文献[8]类似。文献[11]通过参数设计，使逆变器的输出阻抗为感性，但该方法的效果受制于电压、电流环控制参数。文献[12]利用虚拟电抗实现有功功率和无功功率的解耦，取得了较好效果。但文献[8]和文献[12]都忽略了一个重要问题，那就是虚拟阻抗会对功率产生影响（暂且称之为虚拟功率，具体含义下文解释），该功率和 DG 的输出功率是有区别的。引入虚拟阻抗只能说明利用下垂控制可以实现虚拟有功功率和无功功率的解耦；而文献[8]和文献[12]在利用下垂法计算 V，f 指令值时，直接使用了 DG 的实际输出有功功率和无功功率，且没有说明这样是否可行，为什么可行，导致了另一个隐藏问题。

本文分析了文献[11]方法的不足，并特别剖析了文献[8]和文献[12]的潜在问题。在此基础上，引入虚拟电抗和虚拟发电机，利用虚拟发电机的下垂控制实现 DG 输出有功功率和无功功率的解耦，从理论上说明其可行性，并提供了具体实现方法，最后进行了 MATLAB 仿真验证。

1 DG 的控制原理

如图 1 所示，对于直流侧配有储能装置的逆变器型 DG，为了简化分析，将直流侧用一个恒定直流电压表示。图 1 中，DG 输出电流通过 LC 滤波器滤除高次谐波后并入微电网，滤波器的电感、电容和电阻分别为 L_i，C_i，R_i，本地负载阻抗为 $Z_{\mathrm{LD}i}$，线路阻抗为 $R_{\mathrm{L}i}+\mathrm{j}X_{\mathrm{L}i}$，滤波器电容电压为 $V_{\mathrm{O}i}$，DG 输出电流为 $I_{\mathrm{O}i}$，其中，$i=\mathrm{a,b,c}$。

收稿日期：2011-03-21；修回日期：2011-10-27。
国家电网公司科技项目（SG1018）。

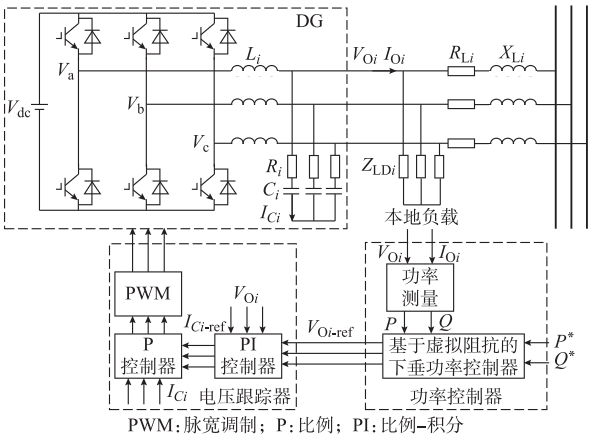

图 1　DG 的控制原理
Fig. 1　Control schematic of a DG

DG 控制系统包括两大部分：基于虚拟阻抗的下垂功率控制器和电压跟踪器。前者根据本地信息利用下垂特性求出 DG 输出电压指令值，实现对有功功率和无功功率的调节；后者控制 DG 的输出电压，使其跟踪指令值。

电压跟踪器的控制方法十分成熟[3,11-12]，此处仅作简要介绍：通常采用电压外环、电流内环的控制方式，电流环采用 P 控制，电压环采用 PI 控制，电压环为电流环提供电流参考值，电流环控制滤波电容电流跟踪该参考值。本文采用与文献[11]同样的设计，整个系统的传递函数可写成如下形式(此处不作具体分析，详见文献[11])：

$$V_O = G(s)V_{O\text{-ref}} - Z(s)I_O \tag{1}$$

2　基于虚拟电抗的下垂功率控制

基于虚拟电抗的下垂功率控制为电压、电流环提供电压指令值，从而实现微电网的功率平衡。

2.1　下垂控制

对于图 2 所示系统，线路阻抗 $Z_L = R + jX$，从 A 点注入的功率 $S = P + jQ$，则

$$P = \frac{E_1[R(E_1 - E_2\cos\delta) + E_2 X\sin\delta]}{R^2 + X^2} \tag{2}$$

$$Q = \frac{E_1[X(E_1 - E_2\cos\delta) - E_2 R\sin\delta]}{R^2 + X^2} \tag{3}$$

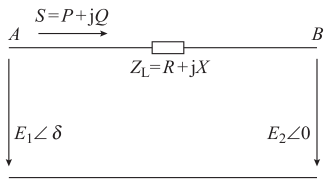

图 2　功率传输示意图
Fig. 2　Power transmission diagram

通常情况下，功角差 δ 很小，$\cos\delta \approx 1$，如果 $X \gg R$，分析时可略去电阻，则式(2)和式(3)可简化为：

$$P = \frac{E_1 E_2}{X}\sin\delta \tag{4}$$

$$Q = \frac{E_1(E_1 - E_2)}{X} \tag{5}$$

由式(4)和式(5)可知，如果线路阻抗呈感性，则 P 主要取决于功角差 δ，Q 主要取决于电压差。因此，通过调节功角和电压，可以分别实现对 P 和 Q 的控制，在实际应用中，通常用 f 代替功角。下垂控制方法具有内在的负反馈过程[13]，当某个 DG 的有功输出过多时，下垂控制会减小其频率，相应减小其功角，从而减小其有功输出，反之则增加输出，如此形成一个负反馈，若参数选取适当，可最终达到稳定。

这种控制理念也被运用到微电网控制之中，具体方法可参见文献[3]。

2.2　基于虚拟电抗的下垂控制

P-f 和 Q-V 下垂控制的前提是线路 $X \gg R$，而微电网线路一般呈阻性，P 和 Q 之间存在强耦合而相互影响，因而影响下垂控制的效果，在控制过程中可能出现振荡甚至不稳定。结合式(3)所示无功功率精确表达式，由于 $E_1 X(E_1 - E_2\cos\delta)$ 相对较小，在某些情况下，$E_1 E_2 R\sin\delta$ 和前者具有可比性，而该项又和有功功率密切相关，有功功率越大，$\sin\delta$ 也越大；特别是在 R 相对较大的情况下，如果 DG 的有功输出差异很大，甚至可能出现一部分 DG 输出无功功率，而另一部分 DG 吸收无功功率的情况。

为了使下垂控制法适应阻性线路，文献[11]通过控制参数的设计，使 DG 的输出阻抗(即式(1)中的 $Z(s)$)在基频段呈感性，取得一定效果。但 $Z(s)$ 取决于电压、电流环的控制参数，其选取必须保持控制器的稳定，因此受到较大限制。并且 DG 的功率传输特性不是取决于 $Z(s)$，而由 $Z(s) + Z_L$ 共同决定(结合图 2)，$Z(s)$ 的等效幅值相对于 Z_L 很小，即使 $Z(s)$ 在基频段呈感性，其效果也很有限。

文献[8]提出了虚拟电阻的概念，实现 P-V 和 Q-f 解耦(和感性环境下垂控制相反)；文献[12]虽然在 $\alpha\beta$ 坐标系中考虑虚拟电抗，但其本质和文献[8]相同。文献[8]和文献[12]中的虚拟阻抗选取具有较大自由度，效果明显优于文献[11]的方法，但仍然存在一个共同问题，分析如下。

假设引入一个虚拟电抗 L_ξ，根据文献[8]和文献[12]的原理，首先利用 DG 的输出功率 P 和 Q 结合下垂控制求出 V 和 f，进而合成参考电压 V_{ref}，再计算 DG 输出电流在虚拟电抗上的压降，然后用 V_{ref} 减去该压降作为 DG 输出电压的参考值 V_O^*，其

数学表达如下(省略了求虚拟电抗上压降时使用的滤波器)：

$$V_O^*(s) = V_{ref}(s) - sL_\xi I_O(s) \tag{6}$$

假设 DG 完全跟踪了其指令电压(该假设仅是为了便于说明，不影响问题本质)，其等效电路如图 3 所示。

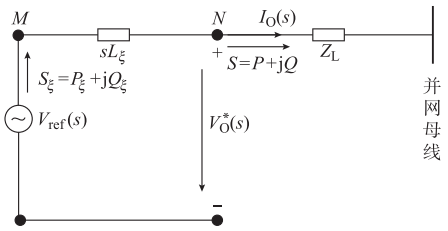

图 3 虚拟阻抗控制的等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit for droop control with virtual impedance

$V_{ref}(s)$是利用下垂控制通过 DG 的输出功率得到的参考电压，它不直接作为 DG 的指令电压，而是减去 DG 输出电流在虚拟电抗上的压降作为 DG 指令电压。结合图 3，$V_{ref}(s)$对应 M 点，引入虚拟电抗后只能说明 M 点注入功率 P_ξ 和 Q_ξ(即虚拟功率)可通过下垂控制实现解耦。N 点功率 P 和 Q 是否可直接通过 M 点电压和频率的下垂控制实现解耦需要理论证明，而文献[8]和文献[12] 未对该问题进行任何说明。

由于不是要控制虚拟功率，而是控制 P 和 Q，因此需要建立 P 和 Q 与 V_{ref}之间的直接联系。

本文从另一个角度研究了基于虚拟阻抗的微电网独立运行控制方法，原理如下。

如图 4 所示，DG 与母线间的线路阻抗 $Z_L = R+jX$呈阻性，将原系统等效，移除 DG，引入一个虚拟发电机，它通过虚拟电抗 $X_\xi=\omega L_\xi$ 连接 B 点。如果$|X_\xi| \gg |Z_L|$，则虚拟发电机与母线间的阻抗将呈感性，如果对虚拟发电机使用下垂控制，无疑可以实现 P_ξ 和 Q_ξ 的解耦控制。显然 $P_\xi=P$，由于 B 点注入的 P 和 Q 等于 DG 输出的有功功率和无功功率，因此调节虚拟发电机的功角 δ_ξ 可以实现对 DG 输出有功功率的解耦控制。

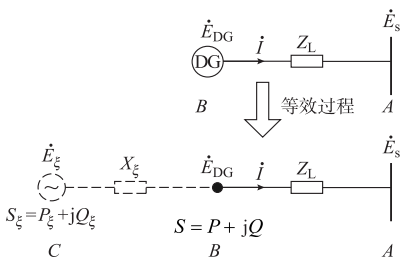

图 4 引入虚拟电抗后的等效系统

Fig. 4 Equivalent system with virtual inductance

需要进一步阐明 2 个问题：①是否可以通过虚拟发电机电压幅值 E_ξ 的下垂控制来实现 B 点无功功率 Q(即 DG 注入系统的无功功率)的解耦控制；②虚拟发电机是一个并不存在的点，如何对其电压进行控制。

对于第 1 个问题，结合图 4，假设 X_ξ 取得足够大，则

$$\begin{aligned} Q &= Q_\xi - I^2 X_\xi = \\ &\frac{E_\xi[(X_\xi+X)(E_\xi - E_s\cos\delta_\xi) - E_s R\sin\delta_\xi]}{R^2+(X_\xi+X)^2} - \\ &\frac{(E_\xi^2+E_s^2-2E_\xi E_s\cos\delta_\xi)X_\xi}{R^2+(X_\xi+X)^2} = \\ &\frac{E_\xi X(E_\xi - E_s\cos\delta_\xi)+}{R^2+} \rightarrow \\ &\leftarrow \frac{E_s X_\xi(E_\xi\cos\delta_\xi - E_s) - E_\xi E_s R\sin\delta_\xi}{(X_\xi+X)^2} \approx \\ &\frac{(E_\xi X + E_s X_\xi)(E_\xi - E_s)}{R^2+(X_\xi+X)^2} \end{aligned} \tag{7}$$

由式(7)可知，可以通过调节虚拟发电机电压幅值实现 DG 注入系统无功功率 Q 的解耦控制。

对于第 2 个问题，利用下垂法求得虚拟发电机的电压指令值后，再减去虚拟电抗上的压降，得 B 点电压；在计算电压降过程中，为保证等效系统和原系统的等同性，其线路电流必须使用 DG 的输出电流。而原系统 DG 的电压又和等效系统 B 点电压相等，因此控制 DG 的输出电压跟踪 B 点电压，就可以间接实现对虚拟发电机端电压的控制，数学表达如下：

$$f_\xi(t) = f^* - m_P(P(t) - P^*) \tag{8}$$

$$E_\xi(t) = E_\xi^* - m_Q(Q(t) - Q^*) \tag{9}$$

$2\pi f_\xi(t)$积分得 δ_ξ，再和 $E_\xi(t)$合成虚拟发电机的瞬时值 e_ξ，则 DG 电压瞬时指令值为：

$$V_O^* = e_\xi - L_\xi \frac{\omega_c}{s+\omega_c}\frac{\mathrm{d}i_O}{\mathrm{d}t} \tag{10}$$

$\omega_c/(s+\omega_c)$是为抑制高频噪声而加入的低通滤波器。在 DG 输出电压完全跟踪指令电压的情况下，上述方法是可行的。但实际上 DG 的电压跟踪有一定误差，下面分析这种误差产生的影响。

忽略低通滤波器，根据式(1)有：

$$\begin{aligned} E_{DG} = V_O &= G(s)V_O^* - Z(s)I_O = \\ &G(s)(E_\xi - sL_\xi I_O) - Z(s)I_O = \\ &G(s)E_\xi - (G(s)sL_\xi + Z(s))I_O \end{aligned} \tag{11}$$

因此，只要选取合适的电压、电流环控制参数，使 $G(s)$尽量等于 1，$Z(s)$尽量等于 0，就可取得较好效果，在最理想的情况下，

$$E_{DG} = E_\xi - sL_\xi I_O(s) \tag{12}$$

相当于在虚拟发电机与并网母线之间串入电抗 L_ξ，

只要 L_ξ 取得相对较大，就可确保线路的感性，从而取得较好的 P 和 Q 解耦控制效果。

结合图 4，DG 电压与 B 点电压相对应，而虚拟发电机电压与 C 点电压相对应，显然，虚拟发电机的电压额定值需要计入虚拟阻抗的影响，则

$$E_\xi=\sqrt{\left(E_{\mathrm{DG}}+\frac{QX_\xi}{E_{\mathrm{DG}}}\right)^2+\left(\frac{PX_\xi}{E_{\mathrm{DG}}}\right)^2}\approx E_{\mathrm{DG}}+\frac{QX_\xi}{E_{\mathrm{DG}}} \tag{13}$$

当 DG 输出最大无功功率 $Q_{\max}$ 时，E_{DG} 达到最小值 E_{DGmin}；当 DG 输出最小无功功率 $Q_{\min}$ 时，E_{DG} 达到最大值 E_{DGmax}。E_ξ 的额定值需要同时考虑这 2 种情况下的电压变化要求，本文取为

$$E_\xi^*=\frac{1}{2}\left[(E_{\mathrm{DGmin}}+E_{\mathrm{DGmax}})+\left(\frac{Q_{\max}}{E_{\mathrm{DGmin}}}+\frac{Q_{\min}}{E_{\mathrm{DGmax}}}\right)X_\xi\right] \tag{14}$$

文献[8]和文献[12]未意识到电压额定值需要依据虚拟阻抗进行调整，这将导致在较大虚拟阻抗情况下，DG 实际输出电压幅值有较大偏离。

引入虚拟电抗后，可以削弱电阻 R 的影响，X_ξ 越大，R 的影响越弱，下垂控制效果越好。但 X_ξ 会使 DG 输出的功率极限下降，也会降低 DG 输出电压的质量，选择虚拟电抗时需综合考虑上述因素。

需要说明的是，如果引入的虚拟阻抗是其他性质(如电阻)，仍然可以按类似原理进行分析。

3　仿真分析

利用 MATLAB 建立了仿真模型。仿真包括两大部分：①仿真文献[11]方法，通过参数设计使 DG 输出阻抗在基频段呈感性，验证其效果；②仿真本文所述改进虚拟阻抗法，验证其功率解耦效果。

仿真系统如图 5 所示，由 2 个 DG 组成，线电压为 380 V，线路 1 和线路 2 的长度皆为 200 m，线路参数 $r=0.641\ \Omega/\mathrm{km}$，$x=0.101\ \Omega/\mathrm{km}$，负荷阻抗 $Z_{\mathrm{LD1}}=500+\mathrm{j}3.14$，$Z_{\mathrm{LD2}}=200+\mathrm{j}3.14$，$Z_{\mathrm{LD3}}=Z_{\mathrm{LD4}}=30+\mathrm{j}12.56$(电阻与电抗串联，电抗值皆为工频值)。

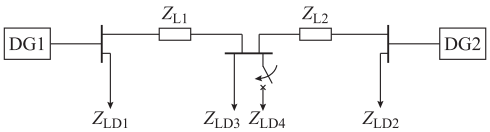

图 5　仿真微电网系统
Fig. 5　A simulated microgrid

2 个 DG 的电压跟踪器参数相同，即直流侧电压 800 V，滤波电感 0.6 mH，滤波电容 1 500 μF，K_{Vp} 和 K_{Vi} 分别为 10 和 100，K_{Cp} 为 5。

为了使效果更加明显，特意设置 $m_{1P}=4\times10^{-5}$，$m_{2P}=8\times10^{-5}$，$m_{1Q}=m_{2Q}=3\times10^{-5}$。DG1 和 DG2 的额定有功功率和无功功率分别为 $P_1^*=P_2^*=0$，$Q_1^*=Q_2^*=0$。负荷阻抗 Z_{LD4} 在 $t=0.4$ s 时投入，开关频率 $f_c=6$ kHz，虚拟电抗滤波器 $\omega_c=4\ 710$ rad/s。

3.1　文献[11]方法仿真分析

文献[11]方法的仿真结果如图 6 所示。其中，P_1，P_2，Q_1，Q_2，V_{DG1}，V_{DG2} 分别为 DG1 和 DG2 的有功功率、无功功率、输出电压。

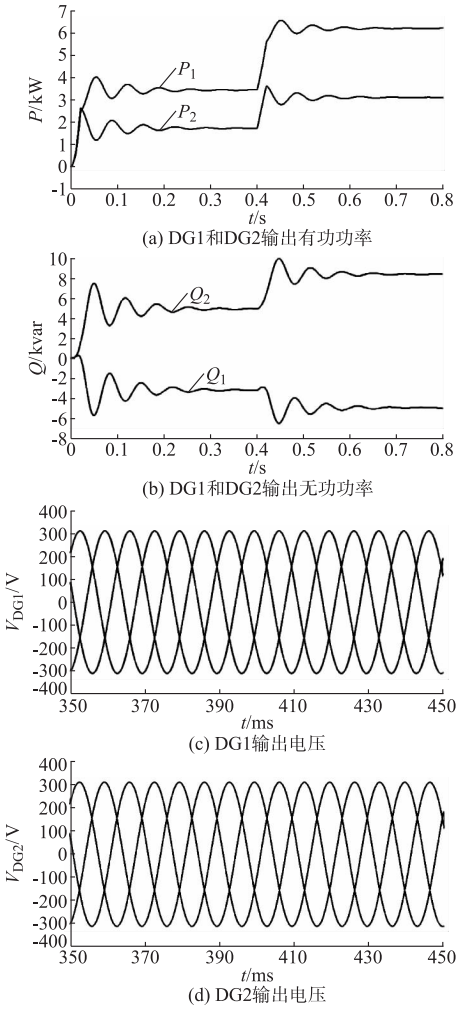

图 6　文献[11]方法仿真结果
Fig. 6　Simulation results of the conventional control method in reference [11]

由图 6(a)可知，虽然线路阻抗呈阻性，但微电网仍然能达到稳定，此时 $P_1:P_2=2:1$；0.4 s 时，Z_{LD4} 投入，经过一段时间后，微电网再次达到稳定，DG1 和 DG2 按比例共同承担新增负荷，此时仍然有 $P_1:P_2=2:1$。这一点是显而易见的，因为整个微电网的频率是统一的，即 $f_1=f_2$，根据式(8)，结合 $P_1^*=P_2^*=0$，则 $m_{1P}P_1=f^*-f_1=f^*-f_2=m_{2P}P_2$，即 DG1 和 DG2 按照 P-f 下垂系数的反比承担负荷。

由图 6(b)可知,在运行过程中出现了如下严重后果:DG2 发出无功功率,DG1 吸收无功功率,而且二者的有功差别增加后,这种情况更加突出。这种现象的原因,上文已有初步分析,现在进一步探讨如下:由于本地负荷相对较小,忽略其影响,$P_1>P_2$,导致 $\sin\delta_1>\sin\delta_2$,而线路的 R 较大,对于 DG1,式(3)中的第 2 项大于第 1 项,所以 $Q_1<0$,而 DG2 的情况与此相反,所以 $Q_2>0$。

仿真过程中采用的电压跟踪器控制参数和文献[11]完全相同,$Z(s)$在基频段呈感性,但是 P 与 Q 之间仍然存在强耦合,振荡较强,这验证了文献[11]方法的不足。

图 6(c)和(d)分别是 DG1 和 DG2 的输出电压,可以看出,在负荷变动过程中,电压变化较小。

3.2 改进虚拟阻抗法仿真分析

DG1 和 DG2 对应的虚拟发电机额定电压幅值不采用 $220\sqrt{2}$ V,而依据虚拟电抗调整为 315.5 V,虚拟电抗都取 3 mH。仿真结果如图 7 所示。

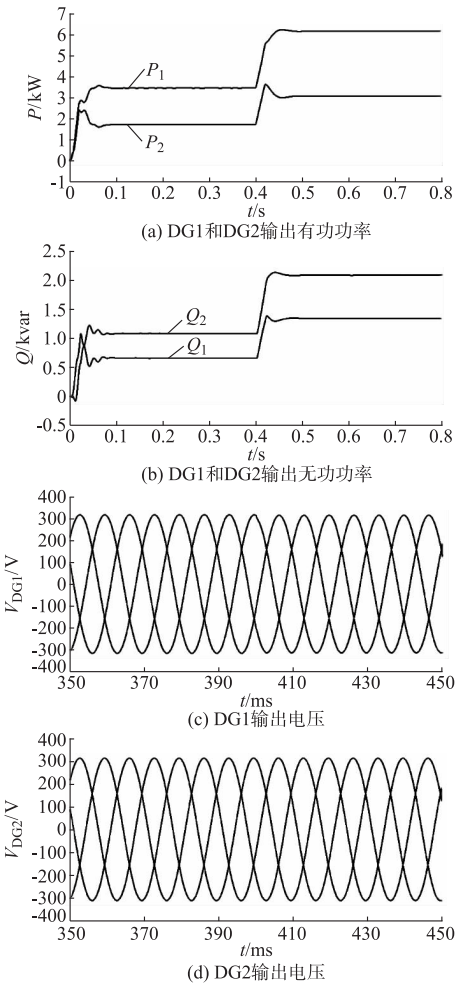

图 7 改进虚拟阻抗法仿真结果

Fig. 7 Simulation results of the proposed method

由图 7(a)可知,由于 f 的"媒介"作用,DG1 和 DG2 输出的有功功率严格按 1∶2 的比例分配。由图 7(b)可知,采用虚拟电抗后,避免了一个 DG 发出无功功率、一个 DG 吸收无功功率的情况。虽然 $m_{1Q}:m_{2Q}=1:1$,但 $Q_1:Q_2\neq1:1$,其原因是:微电网中各个 DG 的输出电压有差别,无法起到"媒介"作用,所以仅利用 Q-V 下垂控制,无法实现 DG 输出无功功率按下垂率的反比分配,即使在线路为纯感性的情况下也是如此;此外,还有本地无功负荷的影响,文献[12]对此有分析。

由图 7 可知,采用虚拟电抗后,振荡也比传统方法弱。

4 结语

本文引入虚拟电抗和虚拟发电机,使线路呈感性。通过对虚拟发电机进行下垂控制,从而实现 DG 输出有功功率和无功功率的控制,完全明确了虚拟阻抗在功率解耦过程中的作用机理,也指出了引入虚拟阻抗后,指令电压额定值需作相应调整并提供了调整方法。

参 考 文 献

[1] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化,2007,31(19):25-34.
LU Zongxiang, WANG Caixia, MIN Yong, et al. Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 25-34.

[2] 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.

[3] LI Yunwei, VILATHGAMUWA D M, LOH P C. Design, analysis, and real-time testing of a controller for multibus microgrid system[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19(5): 1195-1204.

[4] AHN S J, PARK J W, CHUNG I Y, et al. Power-sharing method of multiple distributed generators considering control modes and configurations of a microgrid[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(3): 2007-2016.

·广告·

空心电抗器设计软件

诚邀法人投资合作、经营电抗器产业

一流的设计技术与加工技术诚邀您的加盟

详细介绍见网站:http://appreciate0.qiye.gd.cn

电子邮箱:AppreciateAndIHelp@126.com

搜索关键字:空心电抗器设计与制造、空心电抗器软件设计与制造、电抗器(空心电抗器,铁心电抗器)

联系电话:15295956802 联系人:周先生

[5] 牟晓春，毕大强，任先文. 低压微网综合控制策略设计[J]. 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.

[6] LI Yan，LI Yunwei. Power management of inverter interfaced autonomous microgrid based on virtual frequency-voltage frame [J]. IEEE Trans on Smart Grid，2011，2(1)：30-40.

[7] de BRABANDERE K，BOLSENS B，van den KEYBUS J，et al. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters[J]. IEEE Trans on Power Electronics，2007，22(4)：1107-1115.

[8] GUERRERO J M，MATAS J，MATAS J，et al. Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance[J]. IEEE Trans on Industry Electronics，2007，54(2)：994-1004.

[9] 于玮，徐德鸿. 基于虚拟阻抗的不间断电源并联系统均流控制[J]. 中国电机工程学报，2009，29(24)：32-39.
YU Wei，XU Dehong. Control scheme of paralleled UPS system based on output virtual resistance[J]. Proceedings of the CSEE，2009，29(24)：32-39.

[10] WU K D，WU J C，JOU H L，et al. Simplified control method for parallel-connected DC/AC inverters[J]. IEE Proceedings：Electric Power Applications，2006，153(6)：787-792.

[11] 王成山，肖朝霞，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.
WANG Chengshan，XIAO Zhaoxia，WANG Shouxiang. Multiple feedback loop control scheme for inverters of the microsource in microgrids [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2009，24(2)：100-107.

[12] LI Yunwei，KAO C 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.

[13] TULADHAR A. Advanced control technique for parallel inverter operation without control inter-connections [D]. Vancouver，Canada：The University of British Columbia，1996.

程军照(1982—)，男，通信作者，工程师，主要研究方向：电力电子、分布式发电、微电网技术。E-mail：chengjunzhao@126.com

李澍森(1954—)，男，教授级高级工程师，主要研究方向：电能质量、分布式发电、微电网技术。E-mail：lishusen@sgepri.sgcc.com.cn

吴在军(1975—)，男，博士，副教授，主要研究方向：变电站自动化、分布式发电与微电网技术、电能质量监测与控制。E-mail：zjwu@seu.edu.cn

Analysis of Power Decoupling Mechanism for Droop Control with Virtual Inductance in a Microgrid

CHENG Junzhao[1]，*LI Shusen*[1]，*WU Zaijun*[2]，*CHEN Jiangbo*[1]
(1. State Grid Electric Power Research Institute，Wuhan 430074，China；
2. School of Electrical Engineering，Southeast University，Nanjing 210096，China)

Abstract: Droop control is widely employed in inverter-based microgrids. The effectiveness of droop control can be significantly affected in cases of resistive line impedance because the active and reactive powers are intensively coupled. Two kinds of solutions have been proposed. One is by obtaining the inductive inverter output impedance in fundamental frequency by choosing proper control parameters. The other is by adjusting the reference voltage to inverter by subtracting a voltage drop that is synthesized by inverter output current and a virtual impedance. For the former method，the output impedance will be restricted by control parameters besides an innate shortcoming. For the later method，the feasibility and philosophy of virtual impedance is not provided，moreover，it will lead to voltage deviation. This paper investigates the defects of these two methods and proposes a droop control method by combining virtual generator and virtual inductance. Theoretical analysis and a specific scheme are provided. The effectiveness is confirmed by MATLAB simulation.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. SG1018).

Key words: microgrid；inverter；autonomous operation；droop control；virtual inductance；power decoupling

立足行业　鼓励创新　面向应用
促进电力工业科技进步